# Escritos sobre la construcción cohesiva

Rafael Guastavino

anchor
sheathing
sleeper
anchor

**CEHOPU**
Centro de Estudios Históricos
de Obras Públicas y Urbanismo

**Instituto Juan de Herrera**
Escuela Técnica Superior
de Arquitectura de Madrid

Rafael Guastavino Moreno (1842-1908) nació en Valencia y estudió para Maestro de Obras y Arquitecto en Barcelona. Desde sus tiempos de estudiante sintió un gran interés por las bóvedas tabicadas, que aplicó ya en sus primeros trabajos de arquitecto en Barcelona. Hacia 1880 decide emigrar a América, país en el que esperaba encontrar un ambiente económico y social más favorable para llevar a cabo su propósito: desarrollar la técnica tabicada hasta su perfección. Funda una empresa para la construcción de bóvedas tabicadas y en pocos años participa en la construcción de algunos de los edificios americanos más importantes de la época. Sus bóvedas causan asombro y admiración.

El presente volumen recoge los dos libros que publicó. En *El ensayo sobre la construcción cohesiva* (así llamaba a la construción tabicada), publicado en 1892, expone los orígenes de su interés en este sistema, da un breve repaso de su historia, expone su teoría sobre la singularidad de estas bóvedas y su forma simplificada de cálculo, y, finalmente, discute las ventajas de su aplicación a distintos edificios.

El segundo libro *Función de la fábrica en la construcción moderna*, lo publica en dos partes, en 1896 y 1904. Este libro es una disertación sobre la construcción tabicada. Se trata, como él mismo dice en el prólogo de la primera parte, de un conjunto de reflexiones, unas veces generales, otras de carácter técnico, dirigidas a los arquitectos más jóvenes para el empleo de la técnica tabicada.

Guastavino no es un profesor ni un académico. Expresa sus ideas con sinceridad, pero es evidente el esfuerzo que le supone comunicar su sabiduría técnica. Los libros contienen numerosas observaciones pertinentes sobre la construcción tabicada, pero, sobre todo, son importantes pues nos ayudan a entender el pensamiento y la obra de quizá el último gran constructor de bóvedas de fábrica.

TEXTOS SOBRE TEORÍA E HISTORIA DE LAS CONSTRUCCIONES
*Colección dirigida por* Santiago Huerta

F. Bores, J. Fernández Salas, S. Huerta, E. Rabasa (Eds.). **Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa (Eds.). **Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

A. Choisy. **El arte de construir en Roma.**

A. Choisy. **El arte de construir en Bizancio.**

A. Choisy. **El arte de construir en Egipto.**

A. Choisy. **Historia de la arquitectura.** (en preparación)

A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. A. Tabales (Eds.). **Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

R. Guastavino. **Escritos sobre la construcción cohesiva y su función en la arquitectura**

J. Heyman. **Análisis de estructuras: un estudio histórico.**

J. Heyman. **El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica.**

J. Heyman. **La ciencia de las estructuras.**

J. Heyman. **Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica.**

J. Heyman. **Vigas y pórticos.**

S. Huerta. **Arcos, bóvedas y cúpulas.**

S. Huerta (Ed.). **Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

S. Huerta (Ed.). **Las bóvedas de Guastavino en América.**

S. Huerta (Ed.). **Essays in the History of the Theory of Structures.**

S. Huerta (Ed.). **Proceedings of the First International Congress on Construction History.**

J. R. Perronet. **La construcción de puentes en el siglo XVIII.**

H. Straub. **Historia de la ingeniería de la construcción.** (en preparación)

H. Thunnissen. **Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura.** (en preparación)

A. Truñó. **Construcción de bóvedas tabicadas.**

E. Viollet-le-Duc. **La construcción medieval.**

# Escritos sobre la construcción cohesiva



Retrato de Rafael Guastavino Moreno (Valencia 1842–Asheville, Carolina del Norte 1908) en el decenio de 1880 (Avery Library, Universidad de Columbia)

# Escritos sobre la construcción cohesiva
## y su función en la arquitectura

Rafael Guastavino

edición a cargo de:
Santiago Huerta

INSTITUTO JUAN DE HERRERA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Madrid

CEHOPU
Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo

CEDEX
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
Ministerio de Fomento

El presente libro incluye la traducción al español de los siguientes escritos de Rafael Guastavino Moreno:

*Essay on the theory and history of Cohesive Construction, applied especially to the timbrel vault*. 2ª ed. Boston : Ticknor and Company, 1893.

*Prolegomenos on the Function of Masonry in Modern Architectural Structures* (Part I.). New York: Record and Guide Press, 1896.

*The Function of Masonry in Modern Architectural Structures* (Part II.). Boston: America Printing Co., 1904.

Para los dos últimos se ha utilizado, completamente revisada, la edición española de ca. 1904: *Función de la fábrica en las modernas construcciones arquitectónicas*. s.l., s.a.

Traducción del *Essay*: Gema López Manzanares
Universidad de Alcalá de Henares

Revisión de la *Función de la fábrica* partes I y II: Ignacio Javier Gil Crespo
Universidad Politécnica de Madrid


NIPO: 163-06-012-4
Tapas duras: ISBN-10: 84-9728-223-X; ISBN-13: 978-84-9728-223-9
Rústica: ISBN-10: 84-7790-429-4; ISBN-13: 84-7790-429-4
Depósito Legal: M. 51.370-2006
Cubierta: Sección de la cúpula del hall de los estudiantes en el Columbia College
Fotocomposición e impresión: EFCA

# Índice

## Función de la Fábrica en la Construcción Moderna

# Prólogo

Rafael Guastavino Moreno (1842–1908) nació en Valencia y estudió para Maestro de Obras y Arquitecto en Barcelona. Desde sus tiempos de estudiante sintió un gran interés por las bóvedas tabicadas, aquellas constituidas por hojas de ladrillo sentado de plano, que debió ver construir durante su infancia y adolescencia en Valencia. En sus primeros trabajos de arquitecto aplicó esta antigua técnica constructiva, que se remonta en España al menos al siglo XIV, con enorme inteligencia y audacia. En la fábrica Batlló (1868) cubrió miles de metros cuadrados con una economía antes desconocida, produciendo un espacio libre, racional e incombustible, para colocar los telares. En el teatro de Vilassar de Dalt la cúpula rebajada, de 20 m de luz, tiene de espesor sólo una hoja de rasilla, unos 5 cm (reforzada con nervios): la relación espesor/radio de curvatura más pequeña jamás construida hasta entonces y que sólo se vería superada en Alemania en los años 1920 por las cáscaras delgadas de hormigón armado de Franz Dischinger. Estos primeros trabajos en Barcelona le llevaron al convencimiento de que el perfeccionamiento de la Arquitectura pasaba, necesariamente, por el empleo de la construcción tabicada. Guastavino desconfiaba de la entonces incipiente técnica del hormigón y en el hierro ve sólo un elemento auxiliar, aunque valora su extraordinaria utilidad para contener empujes y redirigir fuerzas.

Hacia 1880 decide emigrar a América, país en el que espera encontrar un ambiente económico y social más favorable para llevar a cabo su propósito: desarro-

llar la técnica tabicada hasta su perfección. Renuncia a su país y a su familia (excepto su hijo primogénito que viaja con él) e inicia una aventura de resultados inciertos. Guastavino «quema sus naves», abandona sus clientes y su bien ganado prestigio, y lo apuesta todo a este cambio. Llega a América en 1881 y en los primeros años intenta trabajar como arquitecto. Tras algunas obras menores, se da cuenta de que como arquitecto independiente nunca llegará a recibir los encargos que le permitirían desarrollar sus objetivos. Acepta la segunda gran renuncia de su vida: para llevar a delante su sueño debe abandonar su oficio de arquitecto y trabajar como constructor para otros arquitectos.

En aquella época la mayor parte de las bóvedas de los edificios americanos eran falsas, simples encamonados colgando de las armaduras de cubierta. Guastavino debe convencer a los arquitectos americanos de que con el sistema tabicado se pueden construir bóvedas verdaderas, si bien mucho más ligeras y baratas que las habituales de piedra o de rosca de ladrillo. Guastavino devuelve la dignidad a una arquitectura histórica donde las bóvedas, la parte esencial, se habían convertido en un simple decorado.

Realiza sus primeras obras importantes hacia 1885, pero es la construcción de la Biblioteca Pública de Boston en 1890 lo que consolida su prestigio de forma definitiva. Las bóvedas de Guastavino causaron asombro a los arquitectos e ingenieros americanos: construidas sin necesidad de pesadas cimbras, simplemente con «formas» o guías de madera de reducida escuadría y con un empleo audaz y novedoso del hierro como elemento estabilizador (tirantes, zunchos, etc.) de los empujes de la fábrica. Con gran rapidez los encargos se suceden y Guastavino desarrolla una actividad asombrosa en el terreno constructivo. Sus sistemas abovedados suponen combinaciones de equilibrio nuevas e incluyen la colaboración activa de elementos metálicos de hierro forjado. En las obras en que interviene Guastavino, las formas de la arquitectura histórica esconden unos trabajos de ingeniería de la construcción ciertamente asombrosos.

Los resultados estaban a la vista y en las revistas se publican las estupendas fotografías con las que Guastavino documentaba minuciosamente sus trabajos. Pero hacía falta más: había que convencer a las autoridades municipales y a los arquitectos de la seguridad y viabilidad técnico-científica de estas nuevas estructuras. A esta tarea se dedicó Guastavino con el mismo ahínco que a la

construcción: patentó su sistema para los distintos elementos constructivos, realizó ensayos de resistencia sobre probetas tabicadas y, finalmente, realizó ensayos estructurales y de resistencia al fuego sobre bóvedas de varios metros de luz. Todo ello fue difundido y explicado mediante artículos y folletos de propaganda. Las fotos de las delgadas bóvedas de Guastavino soportando pesos de decenas de toneladas sin romperse valían más que mil razones y teorías. En el empleo propagandístico de las fotos de ensayos de resistencia su actividad se asemeja extraordinariamente a la desarrollada por Hennebique para promocionar el uso de sus patentes del hormigón armado.

Había además otro aspecto a considerar: era preciso conseguir el respeto de la comunidad académica, de las escuelas de Arquitectura e Ingeniería, y de las academias de Bellas Artes. Con este fin, Guastavino, un hombre sin experiencia académica, que tenía dificultad para expresarse con corrección en inglés, se embarca en una serie de conferencias ante la Sociedad de Bellas Artes de Boston hacia 1890. Su contable Blodgett relata en sus memorias la dificultad y el esfuerzo que le supuso esto a Guastavino. Pero su determinación era inquebrantable. Impartidas las conferencias y publicadas en revistas de gran difusión (The American Architect) quedaba todavía un paso más: publicar un libro que resumiera sus ideas y que diera respetabilidad académica a sus grandes trabajos de constructor.

El *Ensayo sobre la construcción cohesiva*, publicado en 1892 y reimpreso con pocas modificaciones en 1893, es este libro. En él Guastavino relata toda su andadura desde sus primeros trabajos hasta sus obras americanas; da una interpretación sobre la historia del sistema cohesivo; expone sus teorías constructivas y estructurales, y detalla lo que, para él, son las principales fórmulas de aplicación. Finalmente, analiza la aplicación del sistema tabicado a los distintos tipos de edificios, analiza sus ventajas, y rechaza las críticas más usuales.

El *Ensayo* está lleno de interés, no porque sea un gran libro, sino porque nos da claves importantes para comprender la enorme figura de Guastavino. No es un libro académico; no está bien escrito; contiene algunos errores de bulto en aspectos elementales de la teoría de estructuras; en ocasiones incurre en contradicciones; es repetitivo y poco preciso. Todo el libro expresa la enorme dificultad de explicar su actividad constructiva dentro de los parámetros del marco de pensamiento académico de la época.

Guastavino, el mayor constructor de bóvedas de su época, se las ve y se las desea para explicar el funcionamiento de las bóvedas más simples. Emplea fórmulas aproximadas tomadas de manuales (la del arco parabólico, que aplica a los arcos rebajados); acude a simplificaciones que debió aprender en la Escuela de Barcelona (una cúpula empuja la mitad que una bóveda de cañón del mismo perfil); intenta explicar fenómenos complejos de agrietamiento y funcionamiento (la estructura mixta formada por bóvedas tabicadas sobre vigas de hierro), etc. Todo ello con una sinceridad que, a veces, resulta conmovedora. No es su terreno: no es un téorico, un profesor de estructuras, un ingeniero con una sólida formación matemática, ni siquiera es un arquitecto «culto» . . . y, no obstante, arrostra el desafío de escribir y se somete a la tortura de explicar en un lenguaje que no conoce bien aquello que él ya sabe cómo construir. No podemos echárselo en cara: no es su especialidad, no es su trabajo.

Por otra parte, la tarea que se impone es de enorme dificultad. En aquella época, hacia 1890, con una teoría de estructuras suficientemente desarrollada, ésta rara vez se aplicaba al análisis de estructuras completas de edificios. Además, la bóveda tabicada, por su gran delgadez, presentaba además un problema de difícil solución para incluso los mejores teóricos de la época: la teoría de la membrana aplicada a cáscaras delgadas se desarrolla y difunde en los años 1920. Aun así, todavía hoy es difícil comprender la compleja interacción entre bóvedas, rellenos, lengüetas y tabiques de refuerzo, tirantes y vigas de hierro. Al contemplar las secciones constructivas de las bóvedas y cúpulas de Guastavino se siente uno como un principiante viendo la partida de un gran maestro de ajedrez: siempre queda la sensación, la certeza, de que no se ha entendido por completo la intención del maestro, de que la sutileza de la jugada se nos escapa.

El *Ensayo* es interesante, pues, no como un tratado sobre la construcción tabicada, que pueda ser empleado para analizar este tipo de edificios, sino como un reflejo del complejo pensamiento del gran constructor que fue Guastavino, como un testimonio más de su obra. Está escrito con urgencia, con prisa, para conseguir ese reconocimiento académico al que se ha aludido antes.

Después, y a lo largo de lo que le queda de vida, va reuniendo sus pensamientos sobre distintos aspectos de la construcción tabicada, sobre su influencia en la educación, en el perfeccionamiento de la arquitectura de su época, sobre distin-

tos aspectos técnicos (fabricación de morteros, resistencia al fuego, etc.). Estas notas las va juntando para publicar su segundo libro *La función de la fábrica en la construcción moderna*. El libro se publica en dos partes. La primera, con el título de *Prolegómenos* en 1896; en ella manifiesta su intención de dirigirse a los arquitectos jóvenes, convencido de que la difusión del sistema tabicado, que el considera clave para el perfeccionamiento de la arquitectura, pasa por la comprensión y el aprecio de las nuevas generaciones. La segunda parte se imprime en 1904, cuatro años antes de su muerte. El tono es distinto: Guastavino no aspira tanto a convencer, como a informar y discutir. A hacer reflexionar sobre el problema de la arquitectura y su construcción. Hay una mezcla entre exposiciones muy técnicas sobre elaboración de los morteros, características de los ladrillos, propiedades refractarias, etc., y otras partes en las que analiza el papel de la fábrica en la arquitectura, su importancia estética y forma de colaboración con el hierro. Es esta última parte, quizá, la más interesante puesto que toda la obra de Rafael Guastavino (y la de su hijo y continuador Rafael Guastavino Expósito) es una expresión continua de la maestría en la utilización de tirantes y zunchos de hierro de forjado para lograr combinaciones de equilibrio completamente originales. Estas disposiciones permanecen ocultas tras la ornamentación historicista. Sólo los dibujos y detalles constructivos, rescatados por George Collins tras la disolución de la empresa, y conservados en la actualidad en la Avery Library, dejan ver, hasta qué punto llegó la maestría de Guastavino en la utilización conjunta de la fábrica tabicada y el hierro. Como en el *Ensayo*, el texto de la *Función de la fábrica* no puede entenderse sino es en relación con las obras construidas y el lector interesado debe consultar las numerosas imágenes contenidas en el libro *Las bóvedas de Guastavino en América*, de esta misma colección, para comprender el alcance real de sus afirmaciones.

A punto de cumplirse el centenario de la muerte de Guastavino (1908) sirva este libro como homenaje y tributo de admiración a uno de los más grandes constructores de bóvedas de fábrica.

SANTIAGO HUERTA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Avery Architectural and Fine Arts Library (Columbia University in the City of New York) el permiso para incluir la foto del frontispicio y las figuras 2, 7, 9, 10, 11, 12, 15 y 16, en la introducción del presente libro, y a su Director el Dr. Gerald Beasley por su amabilidad y las facilidades que me ha dado para ello. Agradezco también al profesor John Ochsendorf la información sobre las memorias de William Blodgett y el envío de la última biografía de Guastavino, publicada por su nieto Rafael Guastavino IV. Finalmente, también me gustaría agradecer a la profesora Gema López y a Ignacio Gil Crespo el cuidadoso trabajo realizado en la traducción y revisión de las dos partes de estos *Escritos*.

# Introducción:
## La construcción tabicada y la teoría cohesiva de Rafael Guastavino

por Santiago Huerta

La teoría cohesiva de Guastavino se refiere a un tipo de construcción, la construcción tabicada, con una antigua tradición en España. Guastavino intentó interpretar esta forma de construir a la luz de sus conocimientos sobre resistencia de materiales y estabilidad de las construcciones adquiridos en su época de estudiante. Estaba también influido por las teorías francesas del siglo XVIII que se recogieron en manuales de gran difusión como el de Blondel/Patte o el de Rondelet. Estas teorías partían de una base absurda: las bóvedas tabicadas son monolíticas y no empujan. Son, por tanto, esencialmente distintas de las bóvedas de fábrica. Este era el marco de pensamiento aceptado en España en la segunda mitad del XIX. Por supuesto, los constructores colocaban estribos o tirantes, para contener esos empujes «inexistentes». Por otra parte, los edificios históricos presentaban grietas que evidenciaban movimientos.

No se pueden entender ni valorar la teoría cohesiva de Guastavino sin un repaso histórico y un análisis crítico a la luz de la moderna teoría de las estructuras de fábrica. Esta introducción pretende suministrar este marco para que el lector pueda formarse su opinión sobre un asunto, el funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas, sobre el que todavía hoy, a pesar de los avances de la teoría, surgen dudas en el contexto de los trabajos de restauración y consolidación estructural.[1]

## La bóveda tabicada

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, hechas con ladrillo y mortero. Su singularidad proviene de su construcción: los ladrillos se disponen de plano formando una o varias hojas y se ejecutan sin cimbra. En general, los ladrillos se van sentando cerrando arcos o anillos sucesivos, hasta completar la bóveda (Figura 1). Durante su construcción la sujeción de los ladrillos se consigue por la adhesión del mortero de fraguado rápido con los arcos o anillos previos ya terminados, o con los muros de borde. No hay cimbras pero sí se emplean «formas» (cerchas ligeras), camones, o cintreles diversos con el objeto de controlar la geometría de la bóveda, en particular cuando ésta adquiere ciertas dimensiones o se desea una ejecución esmerada (Moya 1947; Gulli 2001). La técnica es en todo análoga a la construcción sin cimbra de bóvedas de rosca de ladrillo, que se emplearon abundantemente en Bizancio. En este último caso, cuando se emplea mortero de cal, de más lento fraguado, la adhesión se suplementa inclinando las juntas de los ladrillos, pero el proceso constructivo se desarrolla de modo similar formando arcos y anillos. Estas coincidencias sugieren un origen común, pero la cuestión aún está abierta a un estudio más profundo (González 1999; Mochi 2001; Tarragó 2001).

Las bóvedas tabicadas se pueden construir con espesores muy pequeños. Lo normal es que sean de 2 hojas (unos 10 cm en total, incluyendo la capa intermedia de mortero y los recubrimientos), pero también se construyeron de una hoja (unos 5 cm). Las esbelteces, relación entre el radio de curvatura y el espesor, se encuentran entorno a 100, pero las hay mucho más esbeltas. También pueden salvar grandes luces, como en el caso de la bóveda sobre el crucero de la catedral de San Juan el Divino en Nueva York, que con 33 m de luz es la más grande construida (Ramazzoti 2001).

Hasta mediados del siglo XIX, las bóvedas tabicadas se emplearon para distintos tipos de elementos: a) para cubrir las naves de las iglesias. En este caso, sólo deben soportar su propio peso y la carga ocasional propia del mantenimiento. En general van protegidas por una techumbre superior de madera; b) para formar forjados; c) para construir escaleras. En la primera mitad del siglo XIX se empezaron a utilizar en España y Francia para la construcción de cubiertas y

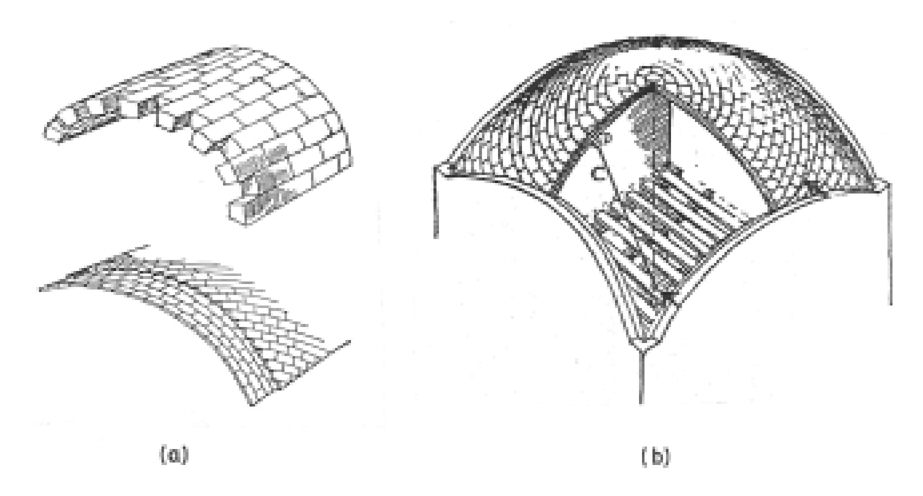



Figura 1
Construcción de bóvedas tabicadas. (a) Comparación entre una bóveda tabicada y una bóveda de piedra de dovelas; (b) Construcción sin cimbra de una cúpula tabicada. La geometría se controla por medio de un cordel atado a un punto fijo (Moya 1947)

suelos de edificios industriales, principalmente de fábricas textiles. El empleo del cemento Pórtland en el doblado permitió usarlas como cubierta, sin necesidad de una techumbre superior u otros métodos de impermeabilización. En la Cataluña de finales del siglo XIX y principios del XX se convirtieron casi en un símbolo nacional (Neumann 1999). Rafael Guastavino las exportó a América, a finales de siglo XIX, y allí les confirió una dignidad que probablemente nunca habían tenido. Las «bóvedas de Guastavino» se construyeron en varios de los edificios más importantes de la zona este de los Estados Unidos de1890 a 1900 (Collins 1968).

La técnica de la construcción tabicada se conoce bastante bien y puede consultarse a este respecto la amplia bibliografía que aparece en las obras de Collins (1968), Gulli y Mochi (1995), González (1999) y Huerta et al. (2001). No ocurre lo mismo en lo referente a su comportamiento estructural. Los primeros tratados de arquitectura no distinguían entre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas y el de las bóvedas de rosca de ladrillo o piedra. Sin embargo, a partir

del siglo XVIII fueron miradas con desconfianza por algunos arquitectos que aludían a su falta de seguridad y durabilidad. Como se ha dicho, se consideraba que las bóvedas tabicadas tenían un comportamiento estructural esencialmente distinto del de las bóvedas convencionales de ladrillo o piedra: se las consideraba monolíticas y sin empujes. Guastavino las encuadró dentro de las estructuras «cohesivas», en contraposición a las estructuras abovedadas por «gravedad». Se intentaron análisis según el método elástico, que en muchas de las ocasiones fracasaron. En España se las llegó a calificar de «imposibles de calcular», lo que llevó a la demolición de muchas de ellas y a su sustitución por otros sistemas estructurales más convencionales.

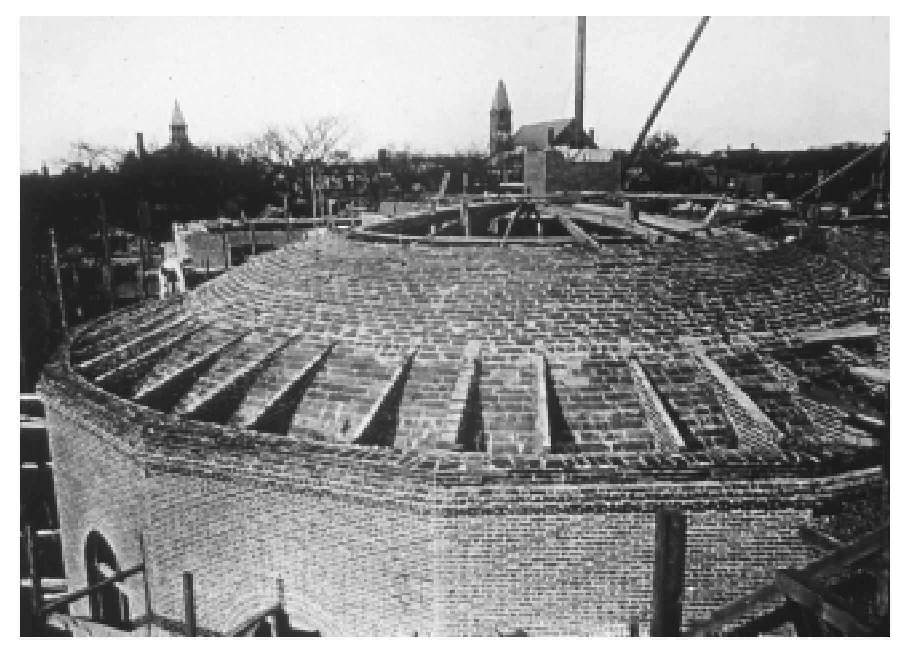


Figura 2
Bóveda tabicada durante su construcción. Las tablas en lo alto no son cimbras sino guías para controlar la geometría durante la ejecución. Nótense los tabiques transversales en los arranques; pueden emplearse para construir sobre ellos la cubierta, pero también son necesarios desde un punto de vista estructural. East Boston High School, Boston, Massachusetts, 1899; de los arquitectos Brown y Moses; el proyecto y construcción de la bóveda se debe a Rafael Guastavino (Avery Library, Universidad de Columbia)

El objetivo principal de este artículo es esbozar la historia de las ideas referentes al comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas, para finalmente devolver a las bóvedas tabicadas a su sitio: las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica. Como cualquier otra estructura fábrica tienen poca resistencia a tracción, se agrietan, y empujan. No son monolíticas ni cohesivas. Pueden y deben calcularse con las mismas herramientas que cualquier otra bóveda de fábrica. No son menos duraderas si reciben el necesario mantenimiento.

## La tradición tabicada en España: Fray Lorenzo de San Nicolás.

Los primeros documentos sobre este tipo de construcción se remontan al siglo XIV (Araguas, 1999), y todavía se conservan bóvedas de esta época en Cataluña. En el siglo XVI su construcción era habitual (Marías, 1991). Eran valoradas por su facilidad de construcción, elevada resistencia, y sobre todo, su menor peso, que permitía reducir considerablemente los muros y machones de contrarresto. Se pueden encontrar referencias directas a las citadas ventajas en algunos informes escritos ca. 1620 durante la construcción del Palacio de Carlos V en Granada (Rosenthal, 1988).

El texto más relevante en cuanto a la construcción y mecánica de las bóvedas tabicadas es el tratado de arquitectura de Fray Lorenzo de San Nicolás, publicado en Madrid en 1639. Fray Lorenzo, que trabajó como arquitecto y construyó muchas bóvedas tabicadas, describe la construcción de los tipos fundamentales de bóveda (de cañón, arista, media naranja, rincón de claustro, etc.) en piedra, rosca de ladrillo y tabicada. No se hacen distinciones en cuanto a la mayor o menor bondad de un material u otro. Fray Lorenzo, al parecer, considera los tres procedimientos igualmente buenos constructivamente y deja al arquitecto la elección en cada caso. Además, resulta muy revelador que, independientemente del material, es preciso dotar a la bóveda de un trasdosado de refuerzo que permita trasmitir los empujes hacia los estribos. Así, indica la necesidad de macizar el trasdos en los arranques hasta el primer tercio de la altura de la bóveda y de disponer muros o tabiques de estribo, que llama «lengüetas» hasta alcanzar el segundo tercio. (Este es el método de construcción tradicional, que se utilizó durante más de doscientos años, y en el último periodo por Guastavino; véase Figura 2).

Fray Lorenzo es explícito en cuanto al papel estructural de estos dispositivos: «...y así como vayas tabicando, la iras doblando y macizando las embecaduras hasta el primer tercio, y esto ha de ser en todas las bobedas, echando sus lengüetas à trechos, que levantan el otro tercio, para que así reciban todo el empujo ò peso de la bobeda». Los rellenos y lengüetas pueden servir para soportar un suelo horizontal pero, además, tienen una función estructural: permiten que la bóveda resista sobrecargas asimétricas o cargas móviles.

Fray Lorenzo se ocupa asimismo del cálculo de los estribos. Da para ello una serie de reglas que se refieren al tipo más habitual en la época: iglesia de una nave con bóveda de cañón de medio punto con lunetos (la planta es de cruz latina, y el crucero se cubre con una cúpula, Figura 3). Procede de forma sistemática, asignando las dimensiones en función del material de la bóveda y considerando dos tipos posibles de estribo: muro continuo o muro con contrafuertes. La exposición es discursiva pero puede resumirse en la Tabla 1.

| *Material* | *Muro uniforme* | *Muro* | *Muro + estribos* |
|---|---|---|---|
| Piedra | *L*/3 | *L*/6 | ≥ *L*/3 |
| Rosca de ladrillo | *L*/4 | *L*/7 | *L*/3 |
| Tabicada | *L*/5 | *L*/8 | *L*/4 |

Tabla 1
Reglas de Fray Lorenzo para el cálculo de estribos. La exposición es discursiva pero es tan sistemática que puede presentarse en forma de tabla (Huerta 2004)

Los antiguos constructores identificaban el empuje de la bóveda con el estribo necesario para resistirlo. La bóveda tabicada empuja menos que la de rosca de ladrillo o piedra, pero empuja, y requiere un sistema de contrarresto.

El tratado de Fray Lorenzo gozó de gran difusión en los siglos posteriores en España (al parecer era empleado por los constructores todavía a principios del siglo XX). No es extraño, se trata de un libro excepcional por la abundancia de temas tratados y por la claridad de su exposición. Sus reglas para los estribos se ci-

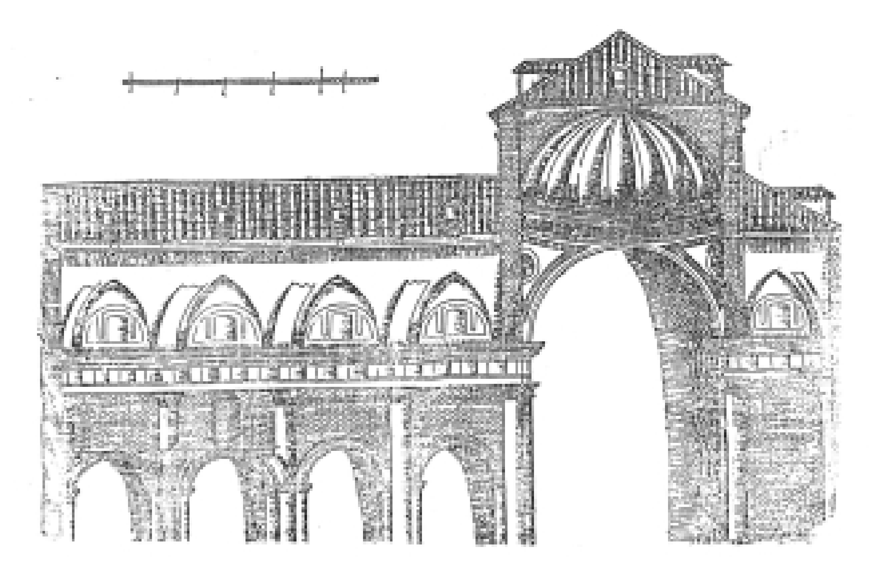


Figura 3
Típica sección longitudinal de una iglesia española del siglo XVII. Nótese el escaso grosor de la cúpula, que puede corresponder a una bóveda tabicada (Fray Lorenzo)

tan en muchos tratados de arquitectura posteriores, por ejemplo el de García Berruguilla (1747) y el de Plo y Camín (1767).

Por supuesto, Fray Lorenzo y el resto de los constructores educados en la construcción tabicada sabían que, una vez terminada la bóveda tabicada, la única diferencia en el comportamiento estructural en relación con las de rosca de ladrillo o de piedra era el menor empuje por la reducción en peso. Seguían haciendo falta estribos, aunque menores. El resto de las circunstancias eran idénticas. En particular las bóvedas tabicadas también se agrietan y las patologías son idénticas a las de ladrillo o piedra.

## La tradición tabicada en Francia: El conde D'Espie y el mito del «monolitismo»

En Francia existió una tradición tabicada de influencia española en la región del Rosellón que Bannister (1968) ha estudiado exhaustivamente. Hacia 1700 esta

tradición constructiva pasó al Languedoc francés y, en particular, el duque de Belle Isle construyó una serie de bóvedas tabicadas en su castillo empleando para ello albañiles de Perpiñán. La construcción de estas bóvedas tan ligeras causó gran sensación en aquel momento y fueron discutidas en la Académie Royale d'Architecture tras una memoria presentada el 19 de junio de 1747 por M. Tavenot (Lemmonier, 1920). La Académie no aprobaba esta nueva (para ellos) práctica constructiva, pero la memoria presentada por Tavenot era relativamente extensa y se incluyó información adicional en los apéndices.

Este tipo de construcción estimuló la curiosidad de un noble ilustrado, ya retirado, el conde D'Espie. Le interesaba la posibilidad de construir forjados y cubiertas tabicados por su excelente resistencia al fuego. Estudió edificios con este tipo de construcción y finalmente construyó un edificio con este tipo de construcción antiincendio. Todas sus experiencias y opiniones las recogió en un pequeño libro, publicado en 1754, titulado «Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la Construction des Voutes, faites avec des briques et du plâtre, dites Voutes plates; et d'un Toit de brique, sans Charpente, appellé Comble Briquete» (Manera de construir toda suerte de edificios incombustibles, o tratado de la construcción de bóvedas, hechas con ladrillo y yeso, llamadas bóvedas planas, y de un tejado de ladrillo, sin madera, llamado «comble briqueté.») El libro tuvo una gran acogida y en pocos años se tradujo y publicó al inglés (1756), alemán (1760), y español (1775). La segunda edición en francés vio la luz en 1776.[2]

Espie comienza su libro tratando las ventajas de la construcción tabicada, haciendo hincapié en su incombustibilidad, así como en su reducido peso y adaptabilidad. Escribe también una detallada descripción del método constructivo. Pero lo que tiene mayor interés para el objetivo de esta introducción es que dedica un capítulo a comparar las bóvedas tabicadas con las bóvedas convencionales: «Parallele des Voutes ordinaries Avec les Voutes Plates» (Espie 1754: 40–58). Empieza describiendo de forma cualitativa la forma en que empujan las bóvedas de fábrica. Así indica que hay que considerar el espesor de la bóveda, su altura o flecha y la altura del estribo. Cita a Bélidor (1729) en relación con el cálculo de empujes y advierte de los peligros de basar los proyectos en una práctica que no se basa en la teoría. Inmediatamente observa que las citadas reglas no se aplican a

las bóvedas tabicadas pues estas son de una naturaleza diferente y no empujan contra los muros: «Les Voutes plates étant d'une nature différente n'ont pas besoin qu'on suivre dans leurs constructions les mêmes regles & les mêmes principes que dans les précédentes, il est donc inutile d'examiner si les murs sont épais ou non . . . car je ne suis pas de ceux qui croient que ces Voutes poussent les murs . . .» (Espie 1754: 44).

Espie atribuye esta ausencia de empujes al carácter monolítico de la bóveda terminada, que forma una masa sólida gracias a la buena calidad del mortero empleado. Como no es posible que se produzcan grietas o se divida en trozos la bóveda no produce empujes: «. . . car le Plâtre lorsqu'il est bien lié avec la Brique fait de toute la Voute entiére un corp massif qui n'a aucun jeu dans ses parties: elles ne se pousseront jamais les unes contre les autres, puisque le tout ensemble ne fait qu'une masse solide qui se contiendra toujours d'elle-même sans se diviser, pour peu qu'elle soit soutenue» (Espie 1754: 57).

A continuación cita una serie de observaciones, unas realizadas por él personalmente, otras referidas por terceras personas, que ratifican la teoría monolítica de ausencia de empujes. En un caso realiza una prueba de carga; en otro, corta la bóveda salvo en las cuatro esquinas. Realiza agujeros en bóvedas construidas para comprobar su resistencia. También relata la experiencia de un conocido que construyó una pequeña bóveda sobre un marco de madera y, una vez fraguado el mortero, la hace rodar por una estancia y la golpea con un martillo. Resulta evidente que quien escribe no es un constructor familiarizado con la técnica tabicada. Es interesante notar el enfoque «científico», intentando obtener conclusiones de los experimentos. Sin embargo los experimentos se pueden interpretar de muchas maneras y, de hecho, muchos de los ensayos que relata se pueden realizar con bóvedas de fábrica convencionales con los mismos resultados. Ninguna teoría es una consecuencia directa de una serie de experimentos.

De cualquier forma, las ideas y experiencias recogidas por Espie fueron aceptadas, en general, sin crítica por los autores posteriores. La ausencia de empujes y la invulnerabilidad al fuego eran argumentos poderosos que suscitaron un interés inmediato, no sólo en Francia sino también en el resto de Europa. El hecho de que hubiera traducciones al español, inglés y alemán en pocos años es un hecho

inusual. Además importantes tratadistas franceses y europeos se hicieron eco de este nuevo sistema constructivo, basándose en el libro de Espie y recogiendo sus ideas. Este es el caso de Laugier (1755) y de Rieger (1763), pero tuvo particular importancia que las bóvedas tabicadas recibieran un extenso tratamiento en el tratado de Blondel/Patte (1771–1777), uno de los más influyentes de su época. En el tomo sexto se le dedica un capítulo completo, con 40 páginas y 7 estupendas láminas, que sin duda contribuyeron a difundir la construcción tabicada (Figura 4).

Dos decenios más tarde Rondelet (1802) resumió esta información en un apartado de su *Traité de l'art de bâtir*, incluyendo ilustraciones. El tratado de Rondelet fue uno de los más influyentes del siglo XIX; se imprimieron numerosas ediciones y fue traducido al alemán e italiano. De este modo a finales de siglo XVIII en

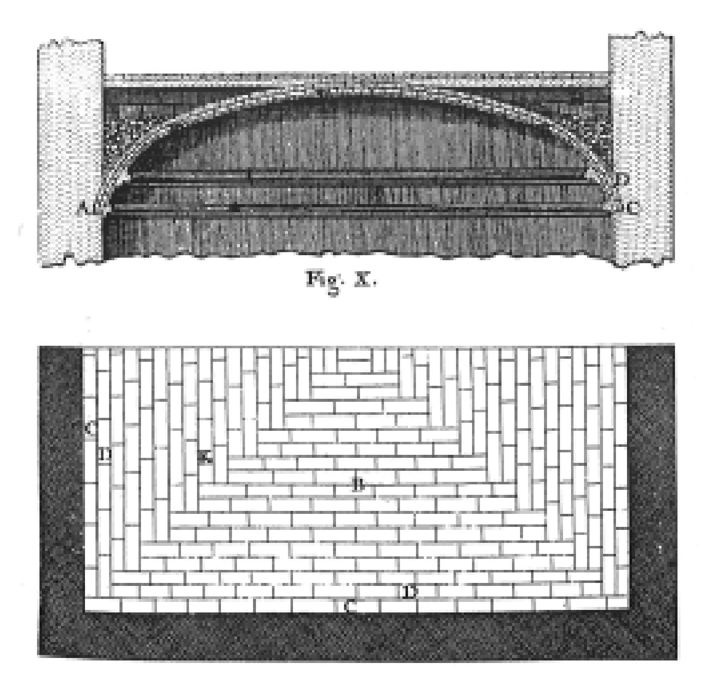



Figura 4
Bóveda tabicada para el forjado de un edificio. Nótese el relleno en los riñones y la existencia de tabiques transversales para soportar el suelo. En planta el tipo de aparejo de los ladrillos formando arcos sucesivos paralelos a los muros (Blondel 1777: vol. 6, Lámina 95)

Francia había una teoría de la construcción tabicada que se basaba principalmente en las opiniones de un noble ilustrado que quería «servir a la comunidad».

Algunas de las ideas más fantásticas sobre las bóvedas tabicadas (monolitismo, ausencia de empuje, etc.), que se difundieron con rapidez por toda Europa (incluso volviendo a España donde la influencia francesa era muy grande entonces), tenían su origen en el tratado del conde de Espie. Estas ideas llegaron a formar el marco de referencia para aproximarse a estas estructuras.

## La edición española de Sotomayor y la «Censura» de Ventura Rodríguez

El libro de Espie fue traducido al castellano por Joaquín de Sotomayor (1776). Sotomayor incorpora, entre corchetes, sus propias opiniones y experiencias. Resulta interesante que el libro vaya precedido de una «Censura de D. Ventura Rodríguez, Architecto mayor de Madrid», uno de los arquitectos españoles más importantes del siglo XVIII. El comienzo marca el tono de la censura: «Lograría considerables ventajas el arte de edificar, si todas las ideas que nos proponemos asequibles tuvieran en la práctica el buen éxito que a la fantasía aparece». A continuación sigue una crítica acerba de las ideas fundamentales de Espie: el monolitismo y la consiguiente falta de empujes. Ventura Rodríguez cita varios casos de agrietamientos y desplomes en edificios construidos que demuestran el empuje de las bóvedas: «Pero esta suposición [de ausencia de empujes], o creencia, es lisonjera no obstante las experiencias que cita, y no se verifica efectiva, como acreditan los evidentes ejemplos que tenemos en casi todos los Templos de Madrid, cuyas bóvedas son tabicadas de ladrillo y yeso, de curvatura más elevada, y con paredes más gruesas, amparadas de estrivos, que a favor de la firmeza son grandes ventajas . . . y las vemos quebrantadas por muchas partes, y con desplomo en las paredes, ocasionado del empuje . . .».

Insiste varias veces en la necesidad de dar contrarresto suficiente a las bóvedas tabicadas y recalca la importancia de la «firmeza», además de la «hermosura» y la «comodidad», pues si aquella falta «todo es perdido». Ventura Rodríguez, pues, no comulga con las opiniones de Espie y Sotomayor, considerándolas incluso peligrosas. Hay que resaltar que Sotomayor, como Espie, era un aficionado a la construcción, no un constructor. Ventura Rodríguez, un arquitecto de gran

experiencia vio inmediatamente los errores de la teoría «monolítica», sin empujes, del conde de Espie.

## Los primeros ensayos científicos en Francia

Aparentemente el interés por la construcción tabicada se mantuvo en Francia durante el siglo XIX. Faltan estudios históricos sobre este tema y la única evidencia que hemos encontrado es la realización de ensayos tratando de determinar el empuje y resistencia de las bóvedas tabicadas: D'Olivier (1837) y Fontaine (1865). Es reseñable que en los dos casos se considera el empuje de la bóvedas (contrariamente a lo que indicaban las teorías de Espie) y los cálculos realizados seguían las reglas de la teoría convencional de bóvedas de fábrica. De particular interés son los ensayos de rotura a gran escala descritos por Fontaine. Uno de los ensayos es sobre tres bóvedas tabicadas de 4 m de luz y 0.4 m de flecha, entre perfiles en I de hierro forjado (de 47 cm de canto) con una luz de 6,25 m, cubriendo una superficie total de 72 m$^2$. El ensayo se llevó hasta la rotura, produciéndose para una sobrecarga de 1.250 kg/m$^2$. En otro ensayo anterior sobre una bóveda tabicada de un solo vano de 3,75 m (de nuevo con una proporción flecha/luz de 1/10), se alcanzó una sobrecarga de 2.700 kg/m$^2$, sin llegar a la rotura. Ensayos de tal magnitud no se hacen de manera aislada, siendo más probable que se produjeran en el contexto de la construcción de bóvedas incombustibles para fábricas (de hecho la modulación en planta del ensayo de tres bóvedas coincide con la habitual para fábricas textiles).

## Tratados españoles de la primera mitad del siglo XIX: Bails y Fornés

En el siglo XIX español, la influencia de Espie es evidente en dos tratados que se ocupan de la construcción tabicada, los de Benito Bails (1796) y Manuel Fornés y Gurrea (1841, 1846). Bails fundamentalmente compila y plagia tratados franceses anteriores, en particular el de Blondel/Patte (Navascués 1983). Dedica un capítulo a la construcción tabicada. En primer lugar transcribe los párrafos correspondientes del tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás, pero luego copia

directamente, traduciendo al español, del de Blondel/Patte. Aparentemente no percibe la contradicción entre los dos textos.

Los tratados de Fornés son originales. El primero publicado en 1841, y revisado en 1857, expone la manera de construir bóvedas tabicadas haciendo una nueva aportación. Explica con gran detalle el modo de construir los principales tipos de bóvedas tabicadas: de cañón (con y sin lunetos), de escaleras (a montacaballo y de caracol), cúpulas y pechinas, etc. En cuanto a los empujes, Fornés considera que las bóvedas tabicadas empujan, aunque menos, debido a su menor espesor, siguiendo la tradición de Fray Lorenzo de San Nicolás y Ventura Rodríguez.

No obstante, Fornés conoce las ideas de Espie, probablemente a través de Bails, y empiezan a aparecer contradicciones. Así, en una primera parte del tratado discute la geometría y el espesor de las bóvedas que determinarán los empujes y por tanto la sección de los muros para soportarlos. Pero más adelante escribe: «[la bóveda tabicada] . . . cubierta la obra y paredes enjutas, su fábrica se reduce a un cuerpo sólido, igual por ejemplo a una cobertera de puchero, sin más empuje que el de su peso» (Fornés 1841: 47). Del mismo modo que Bails parece no darse cuenta de estas contradicciones. Sin embargo todos los proyectos de abovedamiento que incluye en su segundo tratado tienen el contrarresto habitual de las estructuras de fábrica.

## La teoría de la «construcción cohesiva» de Rafael Guastavino

Rafael Guastavino Moreno fue el primero en intentar formular una teoría que explicase de forma científica el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. Para encuadrar su obra es necesario dar primero una breve reseña biográfica de su fascinante vida. Nacido en Valencia en 1842, viajó a Barcelona en 1861 donde comenzó sus estudios de maestro de obras, y, después, de arquitecto. En 1866 ya había construido un bloque de pisos y en 1868 comenzó la construcción de la gran Fábrica Batlló. Aquí empleó la técnica tabicada de modo extensivo (Figura 5); para entonces ya estaba convencido que el progreso futuro y la perfección de la construcción de fábrica se basaba en este tipo de edificación. Esta idea se convirtió en el objetivo de su vida.



Figura 5
Fábrica Batlló en Barcelona (1868–1870). Vista del interior con un uso extensivo de las bóvedas tabicadas (Archivo Histórico de la Diputación de Barcelona)

Más tarde construyó algunos edificios en Barcelona (Bassegoda 2001). Luego, ganó un premio en la Exposición de Filadelfia en 1876 y finalmente decidió emigrar a América, llegando a Nueva York en 1881 con su hijo mayor también llamado Rafael. Tras un breve periodo en el que ejerció como arquitecto, decidió que el mejor modo de promocionar el uso de la construcción tabicada era trabajar como constructor. En 1889 fundó la Guastavino Fireproof Construction Company. En ese mismo año comenzó su primera gran obra: la construcción de las bóvedas de la Biblioteca Pública de Boston de los arquitectos McKim, Mead y White. La audacia y ligereza de esta nueva estructura obtuvo gran admiración. Debemos recordar que antes de Guastavino muchas de las bóvedas que se construían en América eran falsas, encamonados que colgaban de armaduras de madera o hierro, lo que era más barato que las bóvedas usuales de piedra o ladrillo. Las bóvedas tabicadas, de mucho menor peso y construidas sin necesidad de pesadas cimbras, resultaron muy atractivas para muchos arquitectos. Tras la Biblioteca Pública de Boston, Guastavino trabajó para algunos de los arquitectos más importantes del momento (Collins 1968). Pero no fue todo tan fácil; este tipo de abovedamiento era completamente desconocido en América y era mirado con reticencia por muchos constructores. Lo primero que tuvo que hacer Guastavino, por tanto, fue convencer a los arquitectos e ingenieros americanos de la resistencia y

alta calidad de estas estructuras, y demostrar su parentesco con grandes obras maestras de la historia de la arquitectura, como el Panteón de Roma o Santa Sofía de Constantinopla.

Guastavino necesitaba una teoría tanto histórica como técnica, algo que sintió desde el principio de su carrera en Barcelona. En primer lugar expuso sus ideas en una serie de conferencias en la Sociedad de las Artes del Instituto Tecnológico de Massachussets en 1889. También en este año publicó una serie de artículos en revistas, y finalmente, presentó sus ideas en un libro. *Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timbrel arch* (Ensayo sobre la teoría e historia de la construcción cohesiva, con particular atención a la bóveda tabicada) publicado en 1892 y vuelto imprimir con mínimas modificaciones en 1893 [Primera parte del presente libro.] (Sobre la génesis de este libro véase Parks (2001)). Con posterioridad Guastavino publicó otros artículos adicionales y ponencias en congresos (para una bibliografía completa véase (Huerta et al. 2001)), y también otro libro titulado *La función de la fábrica en la construcción moderna* (Parte I, 1896; Parte II,1904) [Segunda parte de este libro.]. Este último libro es clave para entender el pensamiento arquitectónico de Guastavino, pero no incluye ninguna novedad en cuanto a las ideas y cálculos sobre el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas. En lo que sigue nos referiremos al *Ensayo* de 1893, que es donde se recoge su teoría estructural sobre la bóvedas tabicadas.

La primera parte es autobiográfica y en ella Guastavino explica las fuentes en las que basa sus ideas. Menciona las clases que recibió en la Escuela de Arquitectura de Barcelona de sus maestros Juan Torras y Elías Rogent. Según dice, fueron ellos quienes le llamaron la atención sobre esta forma de construcción que, según afirma en varios lugares de su libro, había sido olvidada durante largo tiempo. Esta última afirmación resulta dudosa.[3] No sabemos en que pudieron consistir estas clases en Barcelona pero es probable que se tratara de las ideas de monolitismo y continuidad del conde de Espie, recogidas como hemos visto en algunos tratados españoles de entonces (Sotomayor 1776; Bails 1796; Fornés 1841).

Guastavino divide las construcciones de fábrica en dos grupos en función de su comportamiento mecánico: «Podemos dividir la construcción de fábrica en

dos tipos: 1) la construcción mecánica, o construcción por gravedad, y 2) la construcción cohesiva, o por asimilación. La primera se basa en la resistencia de cualquier sólido a la acción de la gravedad cuando es contrarrestado por otro sólido. De este conjunto de fuerzas, más o menos opuestas entre sí, resulta el equilibrio de la masa total, sin tener en cuenta el poder cohesivo del material existente entre los sólidos. La segunda tiene por fundamento las propiedades de cohesión y asimilación de distintos materiales que, por una transformación más o menos rápida, imitan el proceso de formación de conglomerados en la Naturaleza» [p. 25 del presente libro].

La construcción tabicada es cohesiva, pero no es el único tipo de construcción cohesiva. En la segunda parte de su *Ensayo* realiza una revisión histórica que resulta algo confusa. Así, la construcción romana de hormigón es evidentemente cohesiva, pero Guastavino también considera cohesivas la bizantina e islámica de ladrillo y menciona la Edad Media como la época en que se desarrolló verdaderamente el sistema cohesivo. También las grandes cúpulas del Renacimiento son cohesivas. De hecho la lista de edificios citados incluye algunos de los edificios más notables de diferentes épocas y estilos: las termas de Caracalla, Santa Sofía, la catedral de Zamora, Santa Maria del Fiore y el Baptisterio en Florencia, San Pedro de Roma, Santa Genoveva en Paris, San Pablo de Londres, y dos cúpulas tabicadas valencianas, la de la basílica de los Desamparados y la de los Escolapios. Aparentemente, cualquier edificio construido con un material que presente una buena adhesión con el mortero, ya sea hormigón romano, una fábrica de ladrillo o una bóveda tabicada, entra dentro de la construcción cohesiva. No hay duda de que Guastavino está buscando argumentos históricos a favor de la construcción tabicada.

Otro punto de gran importancia es su puntualización sobre el carácter «natural» de la construcción cohesiva de bóvedas tabicadas. Guastavino estaba fascinado por la posibilidad de construir edificios por la aglomeración de pequeñas piezas, como la naturaleza hace al formar sus conglomerados. Describe la profunda impresión que le produjo una visita a la gran cueva del Monasterio de Piedra: «Mientras contemplaba la cascada de agua en aquella inmensa estancia, me invadió el pensamiento de que todo ese espacio colosal estaba delimitado por un único elemento constituido por una sólida masa de cimientos, muros y techo, y

de que se había construido sin cimbras o andamios . . . Esta gruta es realmente un ejemplo magnífico de la construcción cohesiva. ¿Por qué no hemos construido con este sistema?» [p. 4]

Este pasaje es clave a la hora de entender el pensamiento estructural de Guastavino. La idea de que la construcción cohesiva (incluyendo la construcción tabicada) es una construcción «natural» y, por tanto, «más racional, duradera y económica», le vino como una revelación y fue la fuerza motriz que le impulsó en su trabajo durante toda su vida. Como veremos, el carácter cohesivo no influye en el comportamiento esencial de las fábricas tabicadas, pero los trabajos e investigaciones destinadas a mejorar la cohesión se tradujeron en una perfección en la ejecución del sistema tabicado, como nunca antes se había conocido.[4] Por otra parte, en la observación acerca del carácter monolítico de la estructura (cubierta «por un único elemento») se aprecia la influencia de las ideas de Espie, que Guastavino pudo haber escuchado en sus clases en Barcelona. Sin embargo, la característica esencial de la construcción tabicada, la posibilidad de prescindir de cimbras, aunque mencionada, pasa a un segundo plano en el *Ensayo*.

## Ventajas de las bóvedas tabicadas «cohesivas»

Guastavino explica las diferencias entre la construcción por gravedad y la cohesiva en relación con las bóvedas tabicadas, con el fin de poner de manifiesto las ventajas de esta última [pp. 29–31]. Compara un arco tabicado de una hoja con otro arco tabicado de dos hojas (Figura 6). En el arco de una hoja hay juntas entre los ladrillos y por tanto, dice que funcionan como lo hacen las dovelas en un arco un tradicional por gravedad. El arco de dos hojas, con mortero entre ellas, y sentando siempre los ladrillos a matajunta, constituye un arco que funciona al modo de las estructuras cohesivas, capaz de resistir momentos flectores. La evidencia de esta afirmación, dice Guastavino, es que es posible construir arcos de 6 m de luz y sólo 7,5 cm de espesor y al cabo de unas pocas horas los obreros pueden caminar sobre ellos sin ningún peligro, lo que implica sin duda cierta resistencia a los momentos flectores. Finalmente, observa que la forma empleada para la construcción puede correrse sin dificultad bajo la bóveda terminada, prueba de que ésta no se ha deformado. Guastavino atribuía gran importancia a

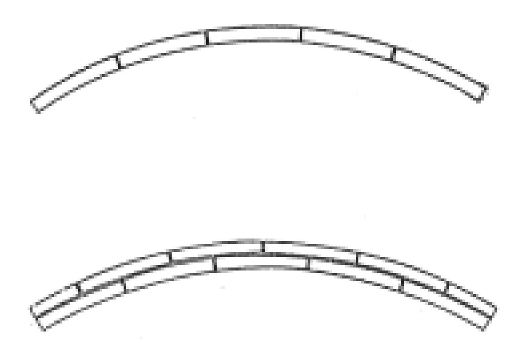


Figura 6
Comparación entre un arco «mecánico» (arriba) y un «arco cohesivo» (abajo)

esta característica de los arcos tabicados, y no es casualidad que él mismo se fotografiara de pie sobre uno de los arcos tabicados de la Biblioteca Pública de Boston que estaban recién ejecutados (Figura 7).

Guastavino atribuía muchas de las ventajas estructurales de las bóvedas y arcos tabicados a la disminución del número de juntas. De hecho si fuera posible construir sin juntas esto sería idóneo: «Es evidente que si fuéramos capaces de construir una bóveda sin juntas, sería lo mejor, ya que no sufriría asientos» [p. 29]. Otra vez aparece el mito del monolitismo. Por supuesto los arcos y bóvedas de fábrica se agrietan debido a cambios en su geometría; este es el único modo en que las estructuras de fábrica se adaptan a los cambios en las condiciones de contorno.[5]

Guastavino resume las ventajas de los arcos y bóvedas tabicados en relación con lo arcos mecánicos: Las juntas verticales quedan protegidas contra el agrietamiento por el doblado a juntas encontradas; hay un menor número de juntas verticales; cuentan con capacidad de resistir momentos flectores. [p. 31]

Por supuesto, los arcos de hormigón en masa son arcos cohesivos sin juntas verticales, pero Guastavino los descarta por el coste excesivo y por los problemas que podría plantear un fraguado irregular.



Figura 7
Construcción de arcos tabicados. El hombre de pie es Rafael Guastavino, demostrando la resistencia de estos delgados arcos. Boston Public Library, 1889–1890, de los arquitectos McKim, Mead y White (Avery Library, Universidad de Columbia)

## Ensayos de resistencia

Guastavino era muy consciente del problema que supondría convencer a los arquitectos americanos de las bondades del sistema tabicado de construcción. Incluso en España, donde la práctica se remontaba a varios siglos atrás, estas estructuras eran vistas a menudo con desconfianza. Las especulaciones teóricas e históricas eran necesarias pero había, sobre todo, que realizar ensayos científicos. Aunque, como se ha visto, se realizaron ensayos con anterioridad en Francia, Guastavino no los conocía y realizó sus propios ensayos. Los primeros ensayos sistemáticos se hicieron en 1887 sobre probetas (Figura 8) [p. 33]. Con posterioridad, en 1901, llevó a cabo ensayos de carga y ensayos de incendios para demostrar la resistencia y la invulnerabilidad al fuego características de la construcción

tabicada. En los ensayos sobre probetas trató de obtener unos valores de las tensiones de rotura a compresión, tracción, cortante y flexión, que le permitieran verificar la seguridad de sus bóvedas por comparación con las tensiones de trabajo. Se trata, pues, del enfoque de resistencia de Navier (Heyman 2001). Los resultados de los ensayos se resumen en la Tabla 2. Es interesante que no se cite ningún intento de determinar las constantes elásticas como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

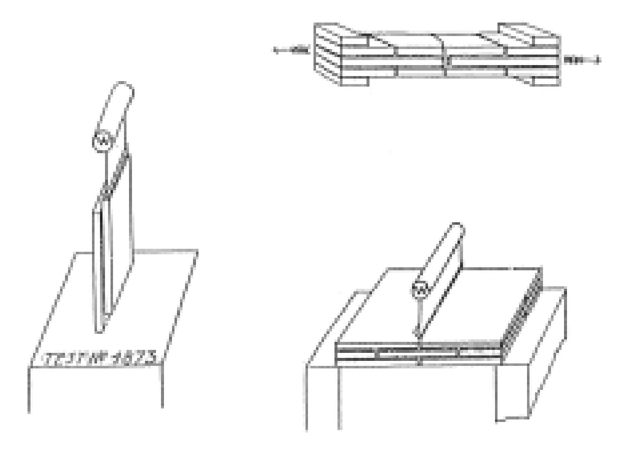


Figura 8
Probetas para los ensyos de resistencia realizados por Guastavino: (a, arriba derecha) tracción; (b, abajo derecha) momento flector; (c, izquierda) cortante

| Resistencia | N/mm$^2$ |
|---|---|
| compresión | 14,6 |
| tracción | 2,0 |
| cortante | 0,9 |

Tabla 2
Tensiones de rotura de probetas tabicadas

Para contrastar estos resultados con estructuras reales, realizó ensayos de rotura sobre bóvedas tabicadas con una flecha de l/l0 de la luz. En la Figura 9 se

muestra la foto de uno de estos ensayos. La foto es espectacular y dice más en favor de la resistencia de las bóvedas tabicadas que cualquier teoría o conjunto de ensayos de laboratorio. En este caso, es evidente que los ensayos tenían una parte propagandística que, por otra parte, era algo frecuente a finales del siglo XIX.[6] En otras ocasiones los ensayos de carga se realizaban en obra durante la construcción (Figura 10).




Figura 9
Ensayo de resistencia sobre una bóveda de cañón tabicada, 1901 (Avery Library, Universidad de Columbia)




Figura 10
Ensayos de carga realizados por Guastavino en una escalera durante la construcción, 1903 (Avery Library, Universidad de Columbia)

## El empuje de las bóvedas y cúpulas tabicadas

Prácticamente las única información sobre los métodos de cálculo empleados por Guastavino se encuentra en el *Ensayo*. (Los métodos gráficos parece que deben atribuirse a su hijo Guastavino Expósito y se tratarán más adelante). Guastavino trata dos temas típicos: la bóveda de cañón rebajada y la cúpula esférica, también rebajada. Para obtener el empuje de un arco o bóveda de cañón rebajado da la siguiente fórmula [p. 34]:

$$A\sigma_c = \frac{Pl}{8f} \quad (1)$$

donde $A$ = área por unidad de longitud transversal a la bóveda en la clave; $\sigma_c$ = tensión de rotura a compresión; $P$ = carga total (peso propio más relleno y sobre-

carga) que actúa sobre la bóveda por unidad de longitud; $l$ = luz de la bóveda; $f$ = flecha de la bóveda.

La fórmula relaciona la carga $P$, con el área $A$ (esto es, con el espesor) y la tensión de rotura del material para una determinada geometría del arco. Se trata de la conocida expresión del empuje de un arco parabólico sometido a una carga uniformemente repartida, aunque la «demostración» de Guastavino es difícil de comprender. La fórmula es aproximada ya que la carga real no es exactamente uniforme, pero para bóvedas rebajadas es suficientemente buena. Guastavino da un ejemplo de aplicación: calcular el espesor de un bóveda con una luz de 4,5 m, con una relación flecha/luz de 1/10 que ha de soportar una carga uniformemente repartida de 12 kN/m$^2$. El material tiene una tensión de rotura 14,21 N/mm$^2$. Guastavino considera que la tensión de trabajo admisible es 1/10 de la tensión de rotura. Entrando en la fórmula con la tensión admisible de 1,42 N/mm$^2$ se obtiene un espesor de 4,8 cm, esto es dos hojas de ladrillos o rasillas de una pulgada (2,54 cm) de espesor. Por supuesto, considerar 10 como coeficiente de seguridad es, quizá, excesivo incluso para un material irregular como la fábrica tabicada y más adelante Guastavino reconoce que se podría considerar como tensión de trabajo 1/4 ó 1/5 de la tensión de rotura [p. 96].[7] De hecho, en las fábricas, también en las tabicadas, el criterio que rige el proyecto de la estructura no es de resistencia sino de estabilidad. La seguridad se obtiene dando un espesor suficiente. Puede ser que la oscilación entre 10 y 4 del coeficiente de seguridad le permitiera a Guastavino obtener el espesor que le parecía adecuado en cada momento.

La fórmula proporciona el espesor en la clave. El esfuerzo será mayor en los arranques y para hallar el nuevo espesor aplica la «fórmula de Dejardin» (Dejardin 1860), que determina el incremento de los esfuerzos desde la clave a los arranques [p. 34]. El cálculo de Guastavino es, evidentemente, un cálculo de equilibrio por el que obtiene un valor del empuje, para luego hacer comprobaciones de resistencia (normalmente innecesarias) y para calcular el sistema de contrarresto, ya sea mediante estribos de fábrica o, con mayor frecuencia, mediante algún sistema de tirantes de hierro forjado.

No obstante, a finales del siglo XIX el cálculo elástico era considerado como la mejor opción para analizar arcos de fábrica y el enfoque de equilibrio,

aunque se empleaba en la práctica, era mirado con suspicacia por los ingenieros. Guastavino con toda probabilidad no tenía la formación suficiente para realizar un cálculo elástico que, incluso, en los casos más sencillos conduce a complicadas integrales. Por este motivo encargó a un profesor de mecánica aplicada del MIT, Gaetano Lanza (1891), la elaboración de una tabla para el cálculo elástico de las tensiones en arcos tabicados, teniendo en cuenta el esfuerzo normal y el momento flector. La tabla se incluye, sin ninguna explicación al final del libro [p. 95]; otro paso más a la hora de dar respetabilidad científica al cálculo de bóvedas tabicadas. Comparando los resultados de la aplicación de su fórmula con la tabla de Lanza no se aprecian, como es lógico para arcos rebajados, diferencias significativas.

Trata a continuación las cúpulas, que considera la forma por excelencia: «La cúpula es la forma mejor de la construcción cohesiva para techos, forjados y cubiertas, así como para la construcción de bóvedas tabicadas» [p. 38]. Para calcular su empuje Guastavino acude a otra aproximación, razonando (erróneamente) de forma geométrica al comparar las áreas de una esfera y un semicilindro de la misma directriz, desarrollados en planta. En efecto, cortando el cilindro como se indica en la figura [p. 43] y juntando las lunas rayadas se podría formar un cúpula poligonal de forma muy aproximada a una esfera y, viendo la planta, Guastavino considera que el peso de la cúpula es la mitad que el de la correspondiente bóveda de cañón y que por tanto el empuje será la mitad. De hecho, el peso es diferente y también cambia la posición de los centros de gravedad, pero el considerar el empuje de la cúpula mitad que el de la bóveda de cañón de la misma directriz, va a favor de seguridad, puesto que es normalmente menor. La idea proviene de Frézier (1760: 3, 406), se difundió después en algunos manuales de arquitectura y construcción, y Guastavino pudo haberla aprendido en sus clases de Barcelona. Si en el caso de los arcos rebajados la fórmula (1) daba una buena aproximación del empuje, en este caso puede haber desviaciones notables (véase nota 17 en p. 170), como él mismo reconoce: «No pretendemos dar un fórmula matemática absoluta, sino una regla práctica que sea suficiente para garantizar la seguridad del edificio».

Guastavino está empleando el conjunto de reglas sencillas que eran habituales en el cálculo de los empujes de arcos de dovelas, bóvedas y cúpulas de fá-

brica, pero aparentemente no es consciente de ello. Por otra parte, tras calcular el empuje de la forma indicada, sin considerar flexiones, incurre en una contradicción al afirmar: «Consideramos nuestro arco no como un arco de dovelas, sino como un arco simple de fundición que trabaja como una pieza maciza arqueada de piedra o hierro» [p. 40] y, más adelante, «Tampoco estamos considerando aquí una cúpula de dovelas, sino una tabicada que funciona como una simple cúpula de fundición, trabajando como una pieza única» [p. 44]. A continuación dedica unos párrafos a explicar por qué el empuje de un arco tabicado existe pero es menor que el de un arco de dovelas y, siguiendo el razonamiento aplicado a las cúpulas, observa que las cúpulas cohesivas, que resisten tracción, forman sus propios zunchos y en consecuencia la cúpula apenas empuja. Sin embargo, en cualquier sección constructiva de una cúpula de Guastavino puede observarse un zuncho metálico para resistir el empuje. En los archivos de Guastavino se encuentran numerosos planos de tales zunchos, que también se aprecian en todas las secciones de cúpulas que se conservan en la Avery Library.

El tratado contiene más observaciones sobre el funcionamiento estructural de las bóvedas tabicadas y algunas de ellas denotan un profundo conocimiento, pero, como se ha visto, el texto está también lleno de incoherencias fruto de querer aplicar su teoría cohesiva. Así, tras haber deslumbrado al lector con una observación penetrante sobre un aspecto del comportamiento estructural de algún elemento, incurre de nuevo en contradicciones o hace afirmaciones dudosas.

## Teoría y práctica en la obra de Guastavino

Tras un examen de la teoría de bóvedas de Guastavino, muchas veces incorrecta y con numerosas contradicciones se podría pensar cómo es posible que fuera, con su hijo, uno de los más grandes constructores de bóvedas y cúpulas de fábrica. La enorme variedad de soluciones constructivas, el ingenio y la maestría que demuestran, la audacia de proyectar cúpulas con formas sin precedente, todo ello contrasta con el carácter ciertamente algo tosco de la teoría. ¿Cómo es esto posible?

Por un lado Guastavino trata de pensar dentro del marco de referencia del monolitismo, la cohesividad, la resistencia a tracción y flexión: es el marco que le ha

sido dado en la época en que vivió, la segunda mitad del XIX, la época del desarrollo de la teoría de la elasticidad, dentro de la que se incorporan con comodidad los conceptos anteriores de Espie (cámbiese monolitismo por continuidad, homogeneidad e isotropismo).

Por otro lado Guastavino es un gran constructor y arquitecto de bóvedas. Posee la intuición que nace del conocimiento de que el problema crucial en el proyecto de las fábricas no es la resistencia sino la geometría. Es la antigua tradición del proyecto de estructuras de fábrica. Además cuando calculaba empleaba el enfoque habitual, y correcto, del equilibrio utilizando reglas sencillas o análisis gráficos. En la Figura 11, por ejemplo, vemos el análisis gráfico de los grandes arcos de fábrica huecos que deberían haber sustentado la cubierta de ladrillo de St. John the Divine (la solución finalmente construida consistió en unas cerchas metálicas convencionales).

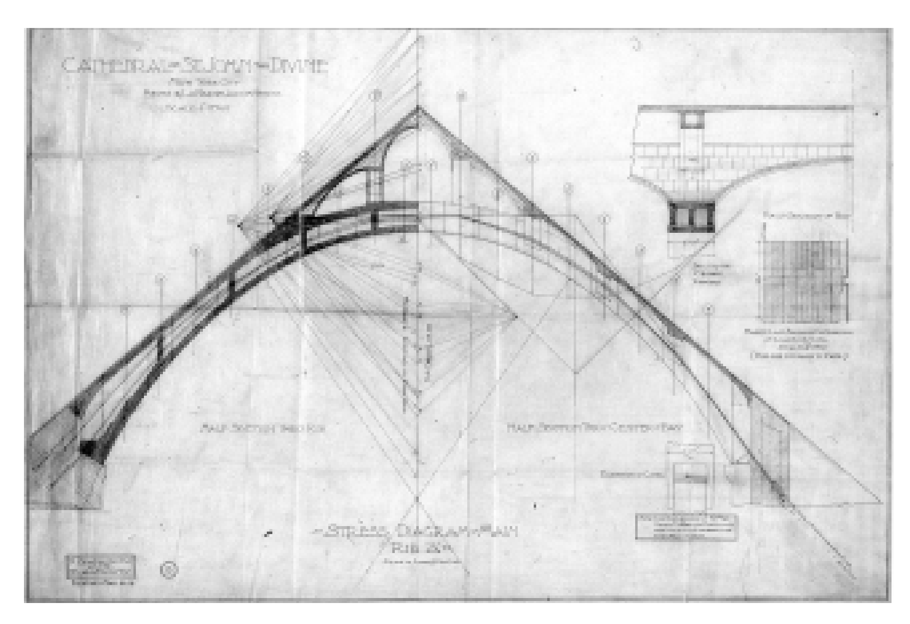



Figura 11
Análisis gráfico de equilibrio del los arco huecos proyectados para la cubierta de la nave de St. John the Divine (1892–1932). Al final, los arcos no se construyeron y la nave se cubrió mediante cerchas metálicas (Avery Library, Universidad de Columbia)

Realmente, para proyectar una cúpula de fábrica no hace falta saber muchas cosas: hay que poder calcular aproximadamente los empujes (para esto bastan las fórmulas anteriores) para poder dimensionar los contrarrestos, tirantes o anillos; y hay que identificar el punto de aparición de las tracciones para disponer tabiques, rellenos, etc., que permitan el «escape» de los esfuerzos fuera de la cáscara tabicada o, en el caso de las cúpulas, anillos que permitan anular o variar la dirección de los esfuerzos. Todo lo anterior está relacionado estrechamente con la forma geométrica de las bóvedas y el propio Guastavino afirma: «El material de una bóveda no sólo trabaja a compresión, sino que como resultado de su forma, también lo hace a tracción, *porque el empuje depende de la forma y no del material*». [p. 44]

Guastavino empleaba, con extraordinaria habilidad zunchos de hierro forjado para controlar la trayectoria de los empujes dentro de la fábrica. Con el mismo objetivo tambíen recurría a otros sistemas como arbotantes, pequeñas bóvedas o pesadas cornisas. El estudio de los dibujos de secciones constructivas de las cúpulas de Guastavino que se conservan en la Avery Library es fascinante. Estos proyectos son evidentemente obra de un gran maestro de la construcción abovedada; véase por ejemplo la Figura 12.

De cualquier forma, hay una contradicción evidente entre ambas matrices de pensamiento y la «esquizofrenia» consiguiente se manifiesta en la expresión verbal pero no en la obra construida, que es la mejor prueba de la maestría de Guastavino.

## Análisis de membrana aplicado a las bóvedas tabicadas: Rafael Guastavino Expósito

Las cúpulas tabicadas son cáscaras delgadas. Parece, pues, obvio para un arquitecto o ingeniero de hoy en día el empleo del análisis de membrana para calcular las fuerzas internas. Esencialmente el análisis de membrana es un análisis de equilibrio con los esfuerzos contenidos dentro de la superficie media de la cáscara (Heyman 1977). Ya Rankine en 1858 (Rankine 1864: 265–8) propuso una formulación sencilla para el análisis de membrana de cúpulas de revolución. Schwedler (1866) desarrolló un método analítico para cúpulas de barras que puede

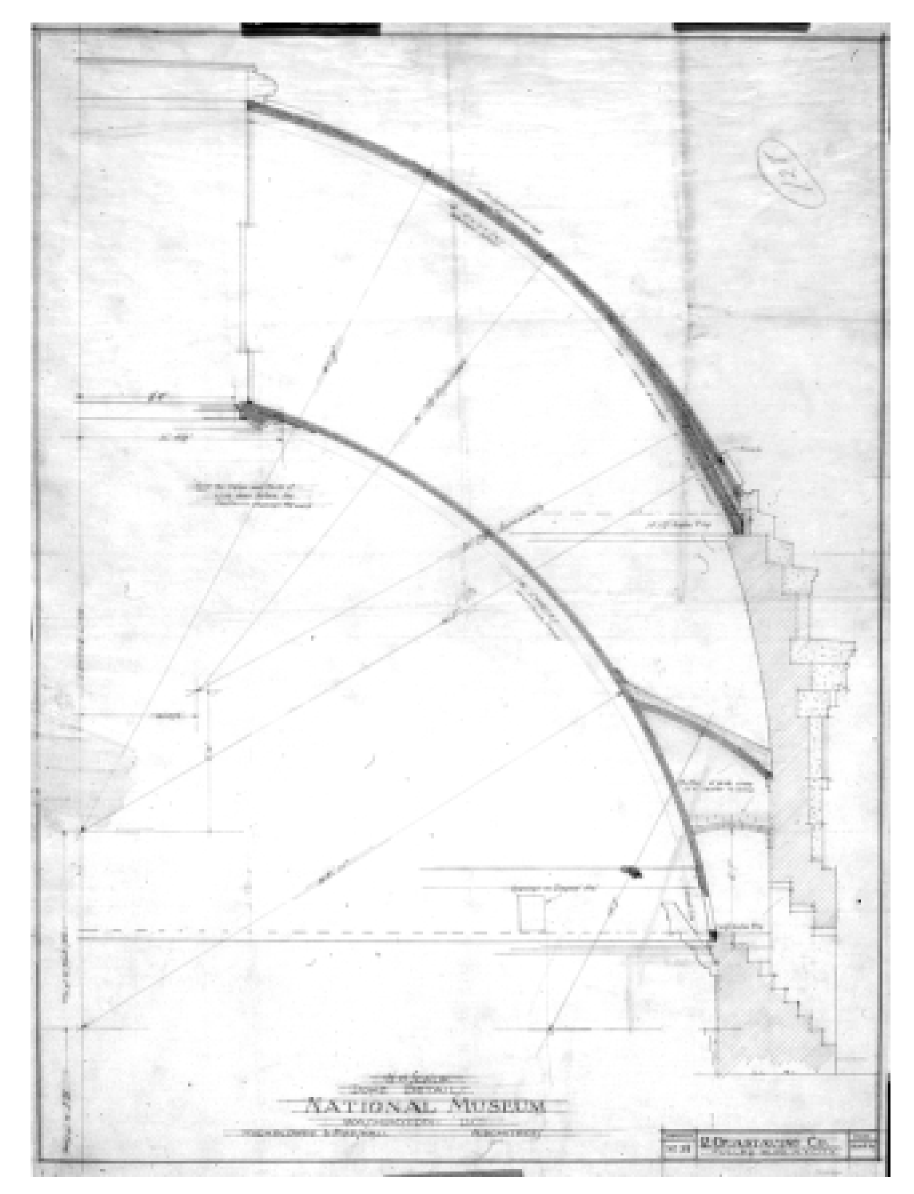



Figura 12
Cúpula tabicada doble en el National Museum de Washington, 1906. Nótense las variaciones en la curvatura de ambas cáscaras para evitar las tracciones y los distintos dispositivos para el empuje de las bóvedas, como zunchos metálicos, arbotantes, pequeñas bóvedas o pesadas cornisas (Avery Library, Universidad de Columbia)

extrapolarse a cáscaras. El primer método gráfico fue propuesto por Eddy (1878), y fue divulgado en dos artículos de Dunn (1904 y 1908). El método de Eddy permite un análisis aproximado de cúpulas de revolución de cualquier forma (Figura 13).[8]

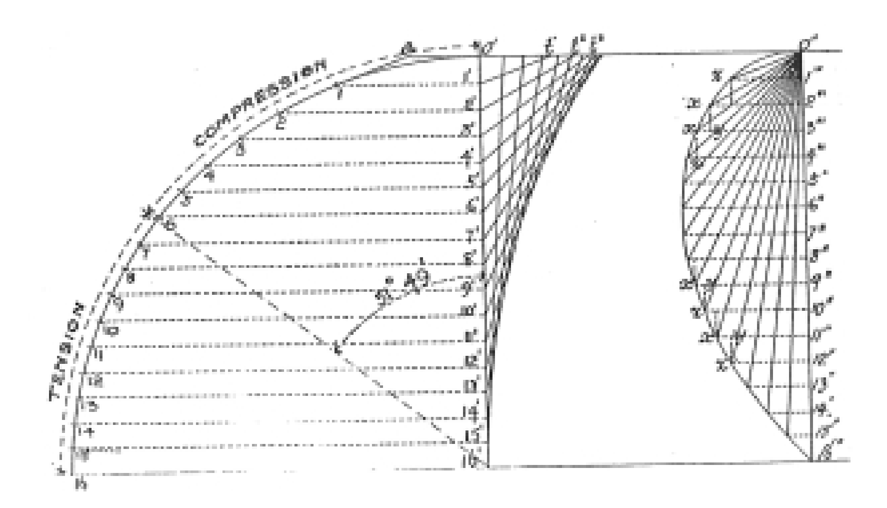



Figura 13
Análisis gráfico de membrana de Eddy para cúpulas metálicas o de fábrica (Dunn 1904)

Rafael Guastavino Expósito (1873–1950) trabajó con su padre en la empresa desde los quince años de edad. Recibió, pues, una formación «medieval» viviendo y trabajando con su padre como los aprendices medievales lo hacían con su maestro. Además, simultaneó esta tarea con estudios sobre arte, arquitectura y estructuras que realizó de manera autodidacta. Es muy probable que leyera a Dunn y decidiera aplicar el método al análisis de cúpulas tabicadas. Particularmente pretendía estimar las tensiones de tracción para poder calcular y disponer refuerzos de hierro forjado. Hay dos zonas críticas: en los óculos cuando existe linterna y en la base (por debajo de los 52° desde la clave en cúpulas hemisféricas cerradas). El método permite, de modo sencillo, determinar las zonas de tracción y en consecuencia colocar los refuerzos. Guastavino hijo patentó esta idea en 1910 (Figura 14).

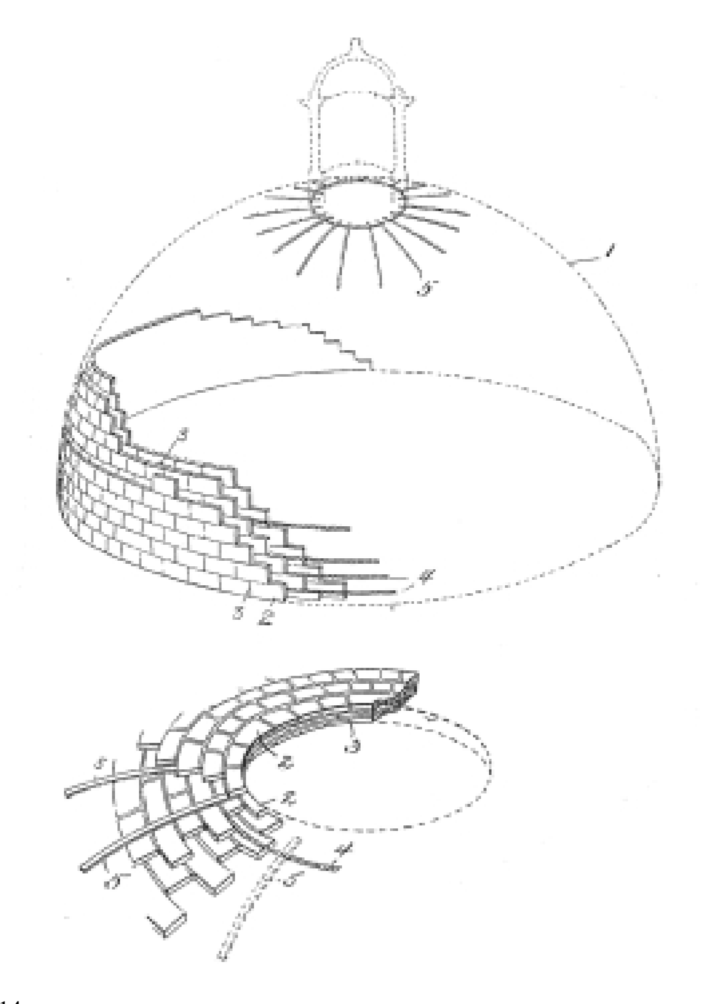


Figura 14
Disposición de refuerzos metálicos en las bóvedas tabicadas. (Patente de Guastavino hijo de 1910)

Guastavino Expósito realizó este tipo de análisis para muchas cúpulas, y en particular para la gran cúpula temporal de St. John the Divine, donde se dispusieron refuerzos metálicos. La Figura 15 muestra lo que parece ser uno de los cálculos previos de una bóveda con una luz de 100 pies (30 m). Guastavino hijo empleaba el método modificado de Dunn (1904). Es interesante ver que en la parte

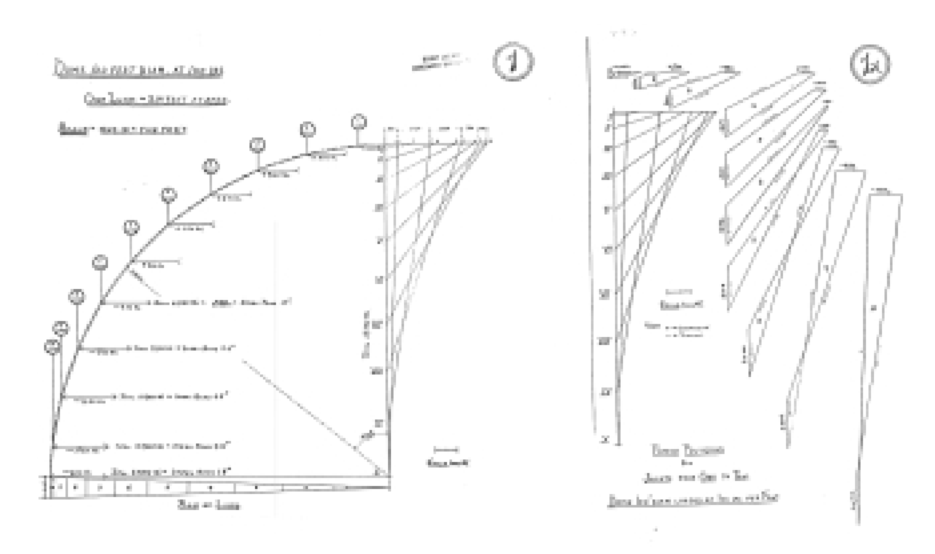


Figura 15
Análisis gráfico de una delgada cúpula con una luz de 100 pies (30 m) (Avery Library, Universidad de Columbia)

derecha la figura, el polígono de fuerzas se divide en partes para entender mejor el método. El análisis de esta cúpula podría haber sido un ejercicio de estudio.

Además, la observación de Eddy, recogida por Dunn, de que a partir del punto de aparición de las tracciones el empuje se mantenía constante (en una cúpula construida en fábrica sin refuerzos), proporcionó la idea para un método de proyecto de cúpulas sin tracciones. La parte superior era un casquete esférico y, desde el punto donde aparecen las tracciones, se podía trazar la forma inferior a partir del diagrama de fuerzas, de manera que la forma resultante correspondiera a una cúpula sin tracciones. En este caso no eran necesarios los refuerzos y los zunchos de la base se podían calcular fácilmente. Los Guastavino hicieron un uso extensivo de este descubrimiento en el proyecto sus cúpulas (Figura 16); véanse también numerosos ejemplos en Huerta (2001: 303–313). De hecho el enfoque es mejor que el enfoque catenario puro (por ejemplo utilizado por Gaudí). La cúpula tiene una única forma geométrica sencilla en la zona superior y sólo se desvía de ella cuando es necesario en la zona de la base.

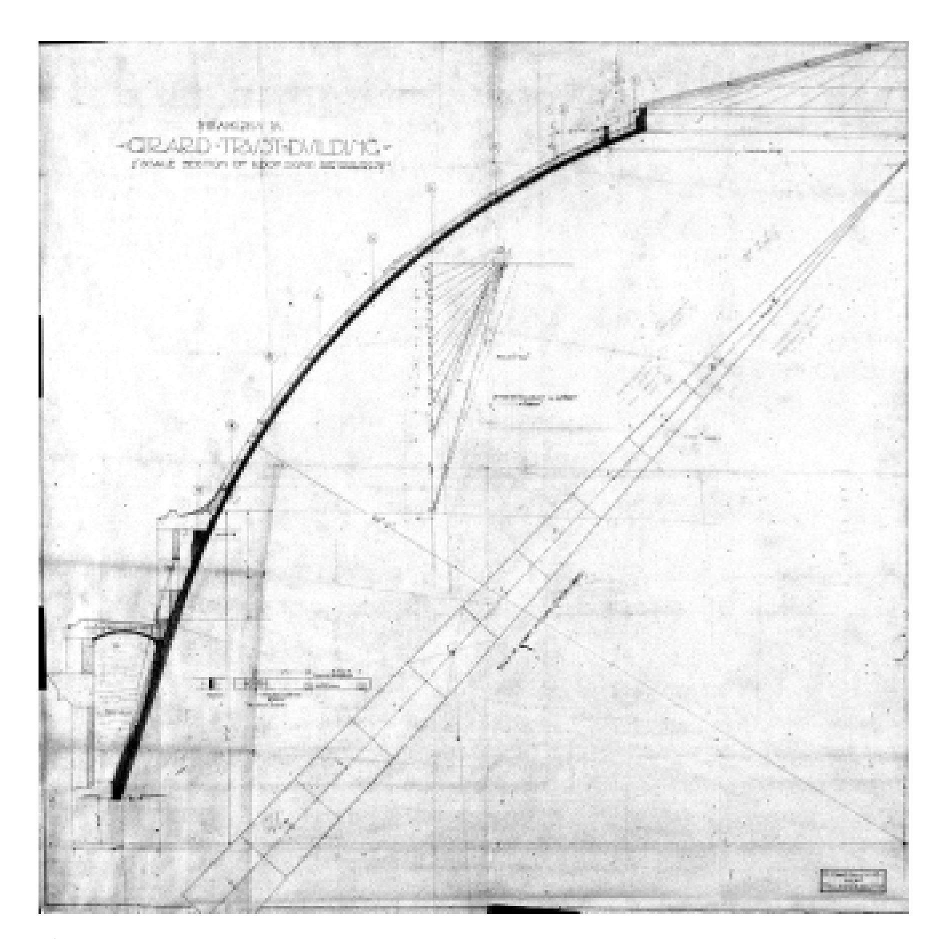



Figura 16
Proyecto de una cúpula libre de tracciones. Nótese el cambio de curvatura por debajo del punto de tensión cero. A partir de este punto la componente horizontal del empuje permanece constante, como se aprecia en el polígono de fuerzas. Cúpula del Girard Trust Building 1905–1907; 101 pies de luz (31 m) (Avery Library, Universidad de Columbia)

Guastavino Expósito no realizó ninguna publicación, aunque sí dio varias conferencias.[9] De hecho, le tocó vivir la decadencia del modo de construcción de fábrica que había aprendido y practicado desde niño. Para mantener la empresa, debió investigar con las posibilidades cromáticas de los ladrillos y, sobre todo, realizó una investigación pionera sobre materiales acústicos colaborando con el

mejor especialista de la época W. C. Sabine. En los años 1930, con el auge de la construcción de cáscaras delgadas de hormigón intentó competir con éstas, y en el Archivo Gustavino de la Avery Library se conservan documentos y recortes que atestiguan un interés activo. Finalmente, construyó una cúpula tabicada para el Planetario Buhl en 1938, aunque desde Dischinger (ca. 1925) se venían construyendo de hormigón armado. Pero ya no era la época de la construcción de fábrica y la empresa vivió sus últimos años de los materiales acústicos y de construir bóvedas para los últimos edificios historicistas, cuya construcción se prolongó en América hasta los años 1960.

## El análisis elástico: Domenech, Bayó, Terradas

La tabla elaborada por G. Lanza para el *Ensayo* de 1893 supone, probablemente, la primera evidencia del cálculo elástico de un arco tabicado. De hecho, a finales del siglo XIX el análisis elástico ya se consideraba el mejor enfoque para los arcos de fábrica (Huerta 1996, 2001). El carácter de la fábrica, heterogéneo y discontinuo, la dificultad para obtener las constantes elásticas, los desplazamientos durante la ejecución, los agrietamientos, etc., eran obvios, y algunos ingenieros eran conscientes de lo dudoso de los presupuestos elásticos aplicados a los arcos de fábrica (véase por ejemplo (Swain 1927: 425; agradezco al profesor Foce esta referencia), pero la potencia de las ideas elásticas era tan fuerte como para vencer cualquier resistencia. Las ideas elásticas de continuidad, tensión y resistencia a los momentos flectores, encajaban muy bien con la ideas de monolitismo de Espie o la teoría cohesiva de Guastavino. La única diferencia fundamental era que los arcos elásticos sí que tenían empuje. De este modo el énfasis estaba en la resistencia de las bóvedas tabicadas a la tracción y a los momentos flectores. Según Bergós, Gaudí llevó a cabo algunos cálculos para tener en cuenta la resistencia a flexión de los arcos tabicados. Sin embargo, Gaudí no publicó nada sobre el tema y el testimonio indirecto de Bergós podría estar influido por sus propias ideas. Surge una pregunta: si Gaudí creía en la resistencia a flexión de las fábricas, ¿por qué empleaba modelos catenarios? (Sobre los modelos catenarios de Gaudí, véase Tomlow (1989)).

Domenech fue el primero en discutir la necesidad de considerar la resistencia a flexión de las bóvedas tabicadas. Para Domenech no hay duda que la única expli-

cación del éxito de las delgadas bóvedas tabicadas proviene de su capacidad de resistir flexiones que pueden llegar a anular el empuje horizontal: «El secreto mecánico de la construcción de estas bóvedas . . . está en no limitar el cálculo de los mismos a la resistencia al esfuerzo de compresión de los materiales empleados, sino aprovechar también las resistencias a la tensión y al esfuerzo transversal que ofrecen nuestros ladrillos auxiliados por los morteros de cal o cemento. Utilizando estas dos resistencias pudo atreverse el constructor catalán a sujetar sus bóvedas a cargas incompresibles en otro . . . siempre con pequeño empuje horizontal en sus apoyos y hasta algunas veces reduciéndose éste a cero». (Doménech 1900: 38–39)

De nuevo aparece la idea del monolitismo rígido de Espie, el mito de la ausencia de empujes y de la resistencia cohesiva a los momentos flectores. Más adelante, sin embargo, Domenech hace un análisis lúcido del funcionamiento de los arcos tabicados tomando como ejemplo el caso de una carga uniforme, caso para el que la línea de empujes es una parábola. Observa que si la directriz del arco coincide con la de la línea de empujes (arcos exactamente parabólicos), sólo habría compresiones, pero no lleva más allá este enfoque. A continuación explica la forma de hallar los momentos flectores y los esfuerzos cortantes y normales, para una línea de empujes dada. Finalmente, discute el problema de la posición de la línea de empujes, considerando la posibilidad de la formación de grietas o «juntas de rotura» en el arco (Figura 17).

El dibujo de Domenech muestra las líneas de empujes fuera de la fábrica y produciendo flexiones. De hecho, Domenech comete un error muy frecuente: identifica como estructura sólo la bóveda, olvidándose de los rellenos de los riñones y de los tabiquillos transversales o lengüetas. Estos elementos son también estructura y ofrecen a los empujes caminos alternativos para alcanzar los contrarrestos (estribos o muros de fábrica, una viga horizontal metálica sujetada por tirantes, etc.). Una bóveda tabicada sin rellenos ni lengüetas no se mantendría en pie mucho tiempo debido a la escasa resistencia a tracción de la fábrica, a su carácter frágil que posibilita la formación de grietas fácilmente, pero por encima de todo, a la ineludible necesidad de agrietarse para adaptarse a pequeños desplazamientos de los apoyos.

Martorell escribió otras consideraciones análogas en cuanto a la resistencia a flexión y la consiguiente reducción del empuje: «Los procedimientos de mecáni-

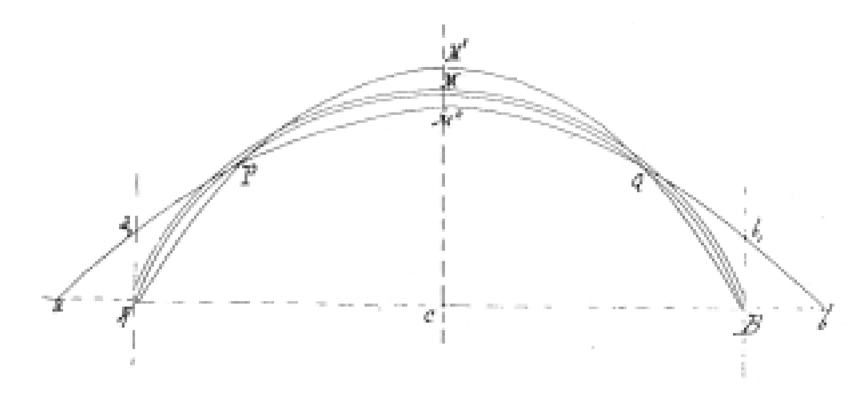


Figura 17
Posibles posiciones de la línea de empujes en arco tabicado (Domenech, 1900)

ca gráfica utilizados generalmente, aplicados a los arcos de ladrillo y de un modo especial a las bóvedas tabicadas, dan resultados más desfavorables de los que en realidad corresponden . . . La cohesión, la rigidez de las bóvedas tabicadas, disminuye en gran manera su empuje y a la vez permite darles formas inverosímiles, tal si fueran láminas metálicas». (Martorell 1910: 143)

Alude a las distintas posiciones de la línea de empujes e, implícitamente, a la aparición de flexiones, resaltando la necesidad de realizar ensayos que permitan calcular «los coeficientes que se usen en el cálculo para evaluar la resistencia a la flexión y los esfuerzos transversales de las bóvedas tabicadas».

Jaime Bayó (1910) es el primero, en España, en proponer el análisis elástico de las bóvedas tabicadas. En su artículo las asimila a arcos metálicos biarticulados, criticando el empleo de los métodos tradicionales de cálculo de arcos de dovelas: «[Al] calcular esta bóveda [tabicada] . . . sujetándola a la curva de presiones de la bóveda dovelada, nace un error, que es suponer que sólo trabajan a la compresión, y no es así, puesto que trabajan también a la tensión, siendo cual lámina metálica sujeta a la flexión». (Bayó 1910: 165)

Para Bayó las bóvedas tabicadas empujan, pero este empuje es el del arco biarticulado elástico correspondiente. Se trata, pues, de hallar lo que él denomina el «funicular de las fuerzas elásticas», esto es, la línea de empujes que

además de estar en equilibrio con las cargas cumple las condiciones de compatibilidad elástica de deformación. Bayó da las fórmulas con las integrales usuales y, luego, explica un procedimiento gráfico de resolución, aplicándolo primero a arcos simétricos de espesor constante o variable, y después a arcos asimétricos. Explica también cómo calcular las tensiones de compresión y tracción y cita los ensayos de resistencia de Guastavino como referencia a la hora de considerar los siguientes valores de tensiones admisibles: compresión 1,5 $N/mm^2$, tracción 0,4 ó 0,5 N/mm2 y cortadura 0,6 N/mm2. El artículo termina con algunas consideraciones sobre el proyecto de bóvedas tabicadas en las que recomienda ajustar el espesor (el número de hojas) a las tensiones de flexión. Observa que en el caso de las bóvedas rebajadas se puede calcular el empuje como si fueran de dovelas, trabajando sólo a compresión, pero que si son peraltadas es preciso adaptar su forma a la de la línea de empujes. Termina el artículo exponiendo un método para proyectar bóvedas tabicadas de cualquier forma: «Si . . . se quieren construir bóvedas equilibradas o de igual resistencia, que respondan al proyecto sugerido por la imaginación del artista, se procederá como en la figura . . . en que después de determinar el funicular de las fuerzas elásticas, se dan a la bóveda espesores relacionados con los momentos». (Bayó 1910: 184) (Figura 18).

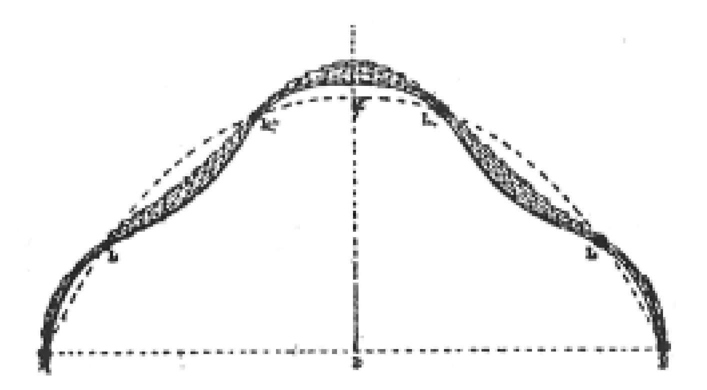


Figura 18
Bóveda tabicada de forma singular (e imposible en la práctica) donde los espesores se proporcionan a los momentos que resultan de un análisis elástico (Bayó, 1910)

No tenemos noticia de que Bayó o cualquier otro arquitecto construyeran nunca una bóveda tabicada con esta forma, pero el dibujo muestra, mejor que ninguna otra imagen, la fe en la resistencia a tracción, en el cálculo elástico y en las propiedades cohesivas de las bóvedas tabicadas.

Finalmente, hay que hacer notar que el cálculo del arco tabicado corresponde al caso más elemental de estructura tabicada. Bayó no menciona ni siquiera el cálculo de formas más complejas y muy habituales: bóvedas vaídas, bóvedas de cañón con lunetos, bóvedas de arista y cúpulas. Para el cálculo de los esfuerzos en estos casos la única aproximación viable y práctica habitual era el cálculo de equilibrio mediante estática gráfica o los modelos colgantes.

## Consolidación del enfoque elástico-cohesivo. Bóvedas «imposibles de calcular»

Las ideas cohesivas formuladas primero por Espie, recogidas, ampliadas y difundidas por Guastavino, aplicadas después al cálculo elástico, se convirtieron en un dogma. En un libro de 1910 sobre la filosofía de las estructuras, Cardellach encuadra a las bóvedas tabicadas dentro de la construcción cohesiva, resalta la capacidad de resistir flexiones y, como Bayó, insiste en la infinita variedad de formas que se pueden construir.

Esteve Terradas, gran ingeniero y matemático, fue el primero en intentar un análisis elástico de una bóveda tabicada más compleja: una bóveda de escalera. La aportación de Terradas ha sido analizada en detalle por Rosell y Serrá (1987). En este contexto hay que resaltar que el estudio de Terradas tuvo su origen en un encargo de Puig y Cadafalch, en 1919, con el fin de resolver el problema que entonces planteaba el cálculo de las bóvedas tabicadas. Pues, como dice Rosell, «las bóvedas de siempre, construidas por los albañiles 'a sentimiento', eran consideradas como imposibles de calcular». Terradas reunió sus croquis, anotaciones y cálculos en una libreta bajo el título «llibreta de la volta».[10]

Terradas intentó realizar un análisis elástico de la bóvedas y examinó problemas elásticos que el conocía muy bien, en particular el del pandeo. Fracasó en su intento. El planteamiento de las ecuaciones de equilibrio elástico para una estructura espacial como una bóveda de escalera a montacaballo es muy complejo. El

fracaso de Terradas tuvo como consecuencia reforzar aún más la idea de la imposibilidad de calcular los esfuerzos en las bóvedas tabicadas.

Con posterioridad, Josep Goday en su discurso de1934 ante la Académia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi, realizó un repaso histórico del cálculo de las bóvedas tabicadas. Acepta las ideas cohesivas de Guastavino y coincide con Bayó y Terradas en que el único enfoque correcto es aquel que considera las bóvedas tabicadas como delgadas láminas continuas elásticas, dentro de la teoría elástica. Al final del artículo Goday discute brevemente el análisis de membrana, si bien no parece apreciar que se trata de un análisis de equilibrio en el que no intervienen las características del material. (La teoría de membrana, aunque data de la segunda mitad del XIX, se popularizó en Europa a partir de los años 1930, principalmente gracias a los trabajos teóricos y a las obras del ingeniero alemán Franz Dischinger, que la empleó para el proyecto de cáscaras delgadas de hormigón armado.)

Por tanto, se confirmaba la idea de que las bóvedas tabicadas sólo se podían calcular como elásticas y, si esta tarea presentaba dificultades insuperables, las bóvedas eran imposibles de calcular. Eduardo Torroja en su libro de 1956 abunda en esta opinión al hablar de la bóveda tabicada, «tan maravillosa en sus realizaciones, que difícilmente alcanzan los actuales conocimientos teóricos a explicar y medir su fenómeno resistente, genialmente intuido por constructores ya desaparecidos» (Torroja 1956). Bassegoda en sus numerosas aportaciones sobre la construcción tabicada (Huerta 2001), realiza consideraciones parecidas y, recientemente, el profesor J. L. González (2004) consideró necesario realizar un ensayo de carga de una escalera con bóveda tabicada para estimar con fiabilidad su resistencia.

### La práctica del cálculo

Como apuntó muy acertadamente Rankine en el ensayo introductorio de su libro de mecánica aplicada, si la pregunta del científico es «¿qué quiero saber?», la del técnico es «¿qué quiero hacer?» (Rankine 1858: 10). La insuficiencia teórica, real o supuesta, nunca ha detenido a los constructores que han manejado en cada momento las herramientas disponibles. Así, mientras los teóricos discutían sobre

la imposibilidad de calcular las bóvedas tabicadas éstas se seguían construyendo y los arquitectos o ingenieros realizaban cálculos sencillos para determinar las dimensiones de los elementos principales: el espesor de las bóvedas, y la dimensión de los sistemas de contrarresto.

Que los constructores pensaban que las bóvedas tabicadas empujaban queda demostrado por la existencia, desde siempre, de estos sistemas de contrarresto. Tanto los ingenieros franceses del siglo XIX como los Guastavino realizaban cálculos de equilibrio aunque las hipótesis que originaban las fórmulas estaban en frontal oposición a su teoría cohesiva. Luis Moya (1947) el último gran constructor de bóvedas tabicadas reconoce la insuficiencia del cálculo debido a la falta de datos sobre las constantes elásticas de las bóvedas tabicadas, pero después realiza, o manda realizar, cálculos de equilibrio en base a líneas de empujes que le bastaron para proyectar y construir sus asombrosas bóvedas.

Bosch (1947) defendía el análisis de membrana, pero para los casos prácticos propone un ingenioso sistema (inspirado, sin duda, en los manuales del siglo XIX sobre la teoría de bóvedas) para calcular el empuje de las bóvedas vaídas tabicadas, imaginando la formación de nervios cruceros virtuales sobre los que apoyarían a su vez unos arcos elementales producidos dando cortes paralelos a los arcos del contorno. De nuevo, es un método de equilibrio que busca encontrar un estado posible de compresiones dentro de la fábrica.

Bergós (1936; 1953; 1965) dedicó varios decenios a investigar las propiedades mecánicas de los muros y bóvedas tabicadas. Realizó ensayos sobre arcos tabicados de varios tamaños (hasta 3,20 m de luz) tratando de justificar la aplicación de la teoría elástica. Pero en los ejemplos prácticos de cálculo que aparecen en sus libros emplea métodos gráficos de líneas de empujes, esto es, métodos de equilibrio.

Ángel Pereda Bacigalupi (1951) publicó uno de los últimos libros sobre cálculo de bóvedas tabicadas. Como Bayó supone los arcos biarticulados, sobre apoyos rígidos, y los calcula con las fórmulas habituales de los arcos elásticos. Aunque lleven tirante no introduce su deformación en el cálculo lo que conduciría a unas tensiones de flexión importantes. De hecho, Pereda es consciente que un cálculo elástico no puede pretender contar con la resistencia a flexión de la bóveda tabicada. Explícitamente busca un espesor tal que la línea de empujes

elásticos esté contenida dentro del tercio central. Para ello Pereda reduce las tensiones admisibles de tracción, mostrando un conocimiento de las propiedades del material superior a sus predecesores en el cálculo elástico.

### El empleo de los métodos de elementos finitos

En la actualidad se ha aplicado el Método de los Elementos Finitos (MEF) al análisis de estructuras de bóvedas tabicadas. Gulli (1993, 1994, 1995) ha hecho ensayos sobre bóvedas de cañón, realizando después, un análisis elástico por medio del método de los elementos finitos. El método de los elementos finitos, como el cálculo elástico tradicional, asimila la fábrica a un continuo al que atribuye ciertas propiedades elásticas lo que requiere prefijar unas condiciones en los apoyos. Estas afirmaciones de compatibilidad y sobre el material, junto con las de equilibrio estático, forman un sistema de ecuaciones que da una solución única. Este enfoque presenta varios problemas. En primer lugar, la resolución del sistema es muy sensible a pequeñas variaciones en las condiciones de contorno. Un pequeño asiento o giro, por ejemplo, en uno de los apoyos, aunque imperceptible a la vista, conducirá a una variación notable del sistema de esfuerzos internos (y el analista puede usar su programa de MEF para verificar este aserto). En segundo lugar, la fábrica tabicada dista mucho de ser un continuo y, además, está frecuentemente agrietada. El empleo de programas de MEF que permiten un análisis no-lineal, por supuesto mejora el modelo, pero éste sigue siendo muy sensible a las variaciones en las condiciones de contorno, a la historia de carga de la estructura, a la formación de grietas en zonas inesperadas, etc. En resumen, el resultado de un análisis elástico o de MEF puede que sea poco significativo, o no lo sea en absoluto, a la hora de entender el funcionamiento resistente de la estructura tabicada o de fábrica en cuestión.

### Conclusión: La bóveda tabicada como bóveda de fábrica

Las bóvedas tabicadas son bóvedas de fábrica, con una buena resistencia a compresión, una baja resistencia a tracción y la posibilidad de agrietarse, formar articulaciones, debido a la imposibilidad de deslizamiento. De hecho, en una estruc-

tura hiperestática de fábrica la formación de grietas es inevitable, y las bóvedas tabicadas tradicionales muestran las mismas patologías que las de piedra o rosca de ladrillo.

Es cierto que la resistencia a tracción permite también una cierta resistencia a flexión. Por ejemplo, un albañil puede andar sobre un delgado arco tabicado. La explicación de la resistencia de cargas mayores o por largos períodos de tiempo hay que buscada en la existencia de otros dispositivos resistentes. Así, las lengüetas o tabiques transversales, o el relleno consistente, que forman la base de un forjado, son en realidad parte de la estructura resistente y permiten soportar cargas móviles de cierta entidad. El principio es siempre el mismo: bien dar una vía de escape a los empujes cuando sea necesario, bien cargar de manera que aquéllos estén siempre contenidos en la fábrica.

La posibilidad de perforación de una bóveda sin que colapse, que se cita desde los tiempos de Espie como una característica de las estructuras cohesivas, la poseen también otras bóvedas de fábrica. Con cierta frecuencia un pináculo cae de un botarel y perfora una bóveda gótica de crucería sin que ésta se hunda.

El carácter cohesivo no es relevante desde el punto de vista estructural. Sí lo es desde el punto de vista constructivo. Permite la construcción sin cimbra, empleando sólo ligeros elementos auxiliares de control de la forma. Las bóvedas tabicadas presentan, además, una cierta resistencia a la flexión que permite el paso de pesos ligeros apenas terminadas, facilitando aún más el proceso constructivo.

En resumen, las observaciones fundamentales sobre el material «fábrica» (buena resistencia a compresión, baja resistencia a tracción e imposibilidad de fallo por deslizamiento) son aplicables también a las bóvedas tabicadas. El Profesor Heyman ha sistematizado estas afirmaciones con el fin de poder englobar la teoría de estructuras de fábrica dentro del marco más general del Análisis Límite. Desde su primer artículo de 1966 hasta la actualidad ha expuesto la teoría con claridad aplicándola después a elementos estructurales básicos: arbotantes, cúpulas, bóvedas de crucería, agujas y torres, puentes, etc. (Los artículos se ha recopilado en Heyman (1995), así como una exposición de su teoría en (1999).)

Dentro del marco del Análisis Límite, el teorema de la seguridad da validez al enfoque del equilibrio: si podemos encontrar una solución de equilibrio para la estructura de fábrica con el material trabajando a compresión, entonces la estruc-

tura es segura. La potencia del teorema reside en la posibilidad de «elegir» la solución de equilibrio. Si el analista es capaz de encontrar una solución de equilibrio a compresión, la estructura también será capaz de ello. De hecho el analista considerará sólo algunos de los infinitos estados de equilibrio posibles en una estructura hiperestática.

Los análisis de equilibrio de la antigua teoría de bóvedas resultan ser, dentro del marco del Análisis Límite, perfectamente correctos (Huerta 2001, 2004).[11] Las fórmulas simplificadas de Guastavino padre, los análisis gráficos y el empleo de modelos catenarios de Gaudí, el análisis de membrana de estados de compresión de Guastavino hijo, son correctos. Los análisis elásticos «a compresión», como los de Pereda citados con anterioridad, son también correctos. Para hablar con mayor precisión, son «seguros»: una estructura proyectada en base a ellas no se caerá y se puede emplear el mismo enfoque para medir su seguridad. No podría ser de otra manera, pues, de hecho, habían conducido a estructuras que llevan en pie más de cien años y esto es una demostración experimental concluyente.

Más aún, las reglas proporcionales tradicionales de proyecto de bóvedas y estribos (del tipo de las de Fray Lorenzo) también son esencialmente correctas (Huerta 2004). El problema de la seguridad de una bóveda de fábrica, ya sea de piedra, rosca de ladrillo, adobe, tabicada o de hormigón romano, es un problema de la forma geométrica de la estructura. Las formas estables contienen líneas de empujes en equilibrio con las cargas. Las reglas tradicionales codifican estas formas y su empleo es racional y correcto.

## Notas

1. El presente artículo es una versión revisada y actualizada de Huerta (2003).
2. En Lemma (1996) se incluye una reproducción facsímil y la traducción al italiano.
3. Esta afirmación de Guastavino parece más que discutible. Ya se ha visto la presencia constante en los tratados españoles desde el siglo XVII. Es también un hecho significativo que una parte importante del tratado de Fornés y Gurrea, publicado en Valencia en 1841 (2ª ed. 1857), esté dedicado a la construcción tabicada. Fornés usa sistemáticamente bóvedas tabicadas en las especificaciones constructivas de su *Álbum de proyectos* de 1846. Parece, pues, que la construcción tabicada era bien conocida en Valencia a mediados del siglo XIX, por no hablar de las extraordinarias cúpulas tabicadas que existen en la ciudad. En cuanto al resto de España, hay que decir que en el tratado de Ger y Lóbez, publicado en Badajoz en 1869, también se explica la construcción tabicada, al mismo nivel que la de rosca de ladrillo o piedra.
4. No es de ningún modo una excepción en la historia del desarrollo de las ciencias y de las técnicas. En ocasiones, la idea motriz, aquella que entusiasma al científico o al artista es falsa, pero el impulso permite desarrollar otras ideas, estas correctas, que suponen un avance en la disciplina en cuestión. Koestler (1964) cita, entre otros ejemplos, el caso de Kepler que, obsesionado toda su vida por la armonía geométrica del movimiento de las esferas, descubrió unas leyes que destruyeron para siempre el ideal geométrico griego del movimiento de los astros.
5. Las primeras interpretaciones de los agrietamientos como resultado de movimientos de los apoyos aparecen a mediados del XIX. Los primeros estudios sistemáticos se deben a Heyman. Ver, por ejemplo, Heyman (1999).
6. Es interesante comparar los ensayos y las fotos de Guastavino, con los realizados por Hennebique sobre el hormigón armado. Véase Delhumeau (1999).
7. El coeficiente de seguridad de 10 aplicado a las fábricas tiene, en realidad, un origen distinto. La resistencia de una fábrica depende de la resistencia de las piedras, de la forma y dimensión de las juntas de mortero, y de la resistencia del propio mortero, como demostraron los ensayos de Tourtay (1885). Así, para sacar coeficientes de rotura habría que ensayar bloques de fábrica de cierto tamaño. Sin embargo, los primeros ensayos se hicieron sobre pequeñas piezas de piedra. Sabiendo que la resistencia de la fábrica sería mucho menor, los ingenieros del XIX tomaban, de forma empírica, como resistencia admisible de la fábrica 1/10 de la resistencia a rotura de la piedra. Por supuesto, la regla no se aplica a los ensayos que se realizan sobre probetas de fábrica, como es el caso de Guastavino. Este hecho condujo a una confusión considerable en los manuales de ingeniería de finales del siglo XIX y, muchas veces, a valores de la tensión admisible de las fábricas absurdamente bajos. (Ver cap. 2 en Huerta 2004).
8. La historia de este método resulta interesante. El libro de Eddy se tradujo al alemán en 1880, Föppl (1881) lo emplea sin citarlo. Cuarenta años después, Dischinger (1928) lo expone como un método gráfico analítico para el cálculo de esfuerzos en cáscaras de forma cualquiera, sin citar origen. A partir de entonces aparece en muchos manuales.
9. En el archivo Guastavino de la Avery Library, se conserva un manuscrito de un artículo de revista de 1929 y el texto de una conferencia impartida en torno a 1914.
10. El profesor Rosell me facilitó una copia de esta libreta y tuvo la amabilidad de comentar conmigo distintos aspectos del trabajo de Terradas.
11. El enfoque del equilibrio ha sido aplicado al cálculo del empuje de bóvedas de arista tabicadas por Fortea y López (1998).

## Referencias

Araguas, Philippe. 1999. Voûte a la rousillon. *Butlleti de la Reial Academia Catalana de Belles Arts Sant Jordi*, vol. 13: 173–185.
Bails, Benito. 1796. *Elementos de Matemáticas. Tomo IX. Parte I. Que trata de la Arquitectura Civil.* Madrid: Imprenta de la Viuda de Joachim Ibarra (ed. facs. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos,1983).
Bannister, T.C. 1968. The Roussillon vault. The apotheosis of a 'folk' construction. *Journal of the Society of Architectural Historians,* 27:163–75.
Bassegoda Nonell, Joan. 2001. La obra arquitectónica de Rafael Guastavino en Cataluña (1866–1881). En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 373–393.
Bayó, Jaime. 1910. La bóveda tabicada. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*:157–84.
Bélidor, B.F. 1729. *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et architecture civile.* Paris.
Benvenuto, Edoardo. 1991. *An Introduction to the History of Structural Mechanics. Part II: Vaulted Structures and Elastic Systems.* New York/Berlin: Springer Verlag.
Bergós Massó, Juan. 1936. *Formulario técnico de construcciones.* Barcelona: Bosch.
Bergós Massó, Juan. 1953. *Materiales y elementos de construcción.Estudio experimental.* Barcelona: Bosch.
Bergós Massó, Juan. 1965. *Tabicados huecos.* Barcelona: Colegio de Arquitectos de Cataluña y Baleares.
Blondel, J.F. 1771–77. *Cours d'Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments... continué par M. Patte.* Paris: Chez la Veuve Desaint.
Bosch Reitg, Ignacio. 1949. La bóveda vaida tabicada. *Revista Nacional de Arquitectura*: 185–99.
Cardellach, Félix. 1970. *Filosofía de las estructuras.* Barcelona: Editores Técnicos Asociados (1ª ed. 1910).
Choisy, Auguste. 1883. *L'art de bâtir chez les Byzantines.* Paris. (Edición en español: *El arte de construir en Bizancio,* S. Huerta y F. J. Girón (eds.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1997.)
Collins, George R. 1968. The transfer of thin masonry vaulting from Spain to America. *Journal of the Society of Architectural Historians,* vol. 27: 176–201. (Traducción al castellano en *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 19–45.)
Dejardin, M. 1860. *Routine de l'etablissement des voûtes.* 2ª ed. Paris: Dalmont et Dunod.
Delhumeau, G. 1999. *L'invention du béton armé: Hennebique 1890–1914.* Paris: Éditions Norma.
Dischinger, Franz. 1928. *Schalen und Rippenkuppeln.* (4ª ed. Handbuch der Eisenbetonbau. VI Band, Zweiter Teil., F. von Emperger ed.). Berlín: Wilhelm Ernst und Sohn.
D'Olivier. 1837. Relatif à la construction des voûtes en briques posées de plat, suivi du recherches expérimentales sur la poussée de ces sortes des voûtes. *Annales des Ponts et Chaussées, 1er série*: 292–309, Pl. 129.
Domenech y Estapá, José. 1900. La fábrica de ladrillo en la construcción catalana. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 37–48.

Dunn, William. 1904. Notes on the stresses in framed spires and domes. *Journal of the Royal Institute of British Architects, Third series,* vol. 11 (nov. 1903 - oct. 1904): 401–412.

Dunn, William. 1908. The principles of dome construction. *Architectural Review,* vol. 23: 63–73, 108–112.

Eddy, Henry T. 1878. *Researches in Graphical Statics.* New York: Van Nostrand.

Espie, Comte d'. 1754. *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles, ou Traité sur la construction des voûtes, faites avec des briques et du plâtre, dites voûtes plates, et d'un toit de brique, sans charpente, appelé comble briqueté.* Paris: Duchesne.

Fontaine, H. 1865. Expériences faites sur la stabilité des voûtes en briques *Nouvelles Annales de la Construction,* 11: 149–159, lám. 45.

Föppl, August. 1881. *Theorie der Gewölbe.* Leipzig: Felix.

Fornés y Gurrea, Manuel. 1841. *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar.* Valencia: Imprenta de Cabrerizo (ed. facs. Valencia: Librería París-Valencia, 1993).

Fornés y Gurrea, Manuel. 1846. *Álbum de proyectos originales de arquitectura, acompañado de lecciones explicativas.* Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo (ed. facs. Madrid: Ediciones Poniente, 1982).

Fornés y Gurrea, Manuel. 1857. *Observaciones sobre el arte de edificar.* Valencia: Imprenta de D. Mariano Cabrerizo (ed. facs. Madrid: Ediciones Poniente, 1982).

Fortea Luna, Manuel y Vicente López Bernal. 1998. *Bóvedas extremeñas. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista.* Badajoz: Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura.

Frézier, A.F. (1754–69). *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois. . . ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture.* Strasbourg/Paris: Charles-Antoine Jombert (1ª ed. 1737–1739).

García Berruguilla, Juan. 1747. *Verdadera práctica de las resoluciones de la Geometría...* Madrid: Imprenta de Lorenzo Francisco Mojados (ed. facs. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, 1979).

Ger y Lobez, Florencio. 1915. *Manual de construcción civil.* 2ª ed. Badajoz: La Minerva Extremeña (1ª ed. Badajoz, 1869).

Goday, Josep. 1934. *Estudi històric i mètodes de càlcul de les voltes de maó de pla.* Barcelona: Acadèmia Catalana de Belles Arts de Sant Jordi.

González Moreno-Navarro, José Luis. 2004. La bóveda tabicada: Pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial. En *Construcción de bóvedas tabicadas,* A. Truñó. Madrid: Instituto Juan de Herrera, xi–lx.

Guastavino, Rafael. 1893. *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timbrel vault.* Boston: Ticknor and Company (1ª ed. 1892)

Guastavino, Rafael. 1896. *Prolegomenos on the function of masonry in modern architectural structures*. New York: Record & Guide Press.

Guastavino, Rafael. 1904 *The Function of Masonry in Modern Architectural Structures.* Boston: America Printing Co.

Gulli, Riccardo.1993. Le volte in folio portanti: Tecnica costruttiva ed impiego nell'edilizia storica e moderna. In *Atti del I Convegno Nazionale Manutenzione e Recupero nella Cittá Storica, ARCO*, 595–604. Roma.

Gulli, Riccardo. 1993. Il sistema tabicado. Una tecnica tradizionale per il recupero. En *Atti del Convegno Internazionale: Il recupero degli edifici antichi, manualistica e nuove tecnologie,* 198–208. Napoli.

Gulli, Riccardo. 1994. Una ipotesi di intervento conservativo per il recupero delle volte in folio portanti. En *Atti del Convegno di Studi: La ricerca del recupero edilizio, Ancona,* 51–62. Bolonia.

Gulli, Riccardo and Giovanni Mochi. 1995. *Bóvedas tabicadas: Architettura e costruzione.* Roma: CDP Editrice.

Gulli, Riccardo. 2001. Arte y técnica de la construcción tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 59–85.

Heyman, Jacques. 1977. *Equilibrium of shell structures*. Oxford: Oxford University Press.

Heyman, Jacques. 1982. *The masonry arch*. Chichester: Ellis Horwood.

Heyman, Jacques. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos,* S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.

Heyman, Jacques. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.

Heyman, Jacques. 2001. *La ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2001.

Huerta, Santiago. 1996. La teoría del arco de fábrica: desarrollo histórico. *Obra Pública,* nº 38: 18–29.

Huerta, Santiago. 2001. Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach. *Structural analysis of historical constructions III. Possibilities of numerical and experimental techniques*. P. B. Lourenço and P. Roca, eds. Guimaraes: Universidade do Minho.

Huerta, Santiago (Ed.). 2001. *Las bóvedas de Guastavino en América.* Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, Avery Library.

Huerta, Santiago; Gema López and Esther Redondo. 2001. Bibliografía seleccionada y comentada sobre Guastavino y la construcción tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 373–393.

Huerta, Santiago. 2001. La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 87–112.

Huerta, Santiago. 2003. The mechanics of timbrel vaults: a historical outline. En *Essays in the History of Mechanics.* A. Becchi, M. Corradi, F. Foce y O. Pedemonte (eds.). Basel: Birkhäuser, pp. 89–133.

Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica.* Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Koestler, Arthur. 1964. *The act of creation*. New York: Macmillan.

Lanza, Gaetano. 1891. *Applied mechanics*. New York: John Wiley and Sons (1ª ed. 1885).

Lemma, Massimo. 1996. *Dei tetti ammattonati. Nuova edizione critica del tratatto scritto da Felix François d'Espie (1754).* Venezia: Il Cardo.

Lemmonier, M. Henry. 1920. *Procès-verbaux de l'Académie Royale d'Architecture, 1671–1793. Tome VI: 1744–1758*. Paris: Édouard Champion.

Marías, Fernando. 1991. Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI. En *Les chantiers de la Renaissance,* J. Guillaume ed. París: Picard: 71–83.

Martorell, Jerónimo. 1910. Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la arquitectura catalana moderna. *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña*: 119–146.

Mochi, Giovanni. 2001. Elementos para una historia de la construcción tabicda. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 113–146.

Moya Blanco, Luis. 1947. *Bóvedas Tabicadas.* Madrid: Dirección General de Arquitectura (ed. facs. Madrid: C. O. de Arquitectos de Madrid, 1993).

Navascués Palacio, Pedro. 1983. Estudio crítico de la Arquitectura Civil de Benito Bails. En *La arquitectura civil,* B. Bails. Murcia: C. O. de Aparejadores y Arquitectos Técnicos. Vol. 1.

Neumann, Dietrich. «The Guastavino system in context: History and dissemination of a revolutionary vaulting method», *APT (Association of Preservation Technology) Bulletin* 30, 4 (1999): 7–13. (Traducción castellana en *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 147–154.)

Newlon, Howard (Ed.). 1976. *A Selection of Historic American Papers on Concrete, 1876–1926.* Detroit: American Concrete Institute.

Parks, Janet y Alan G. Neumann (Eds.). 1996. *The Old world builds the New. The Guastavino Company and the technology of the catalan vault, 1885–1962.* Exhibit catalogue. New York: Avery Architectural Library and the Miriam and Ira D. Wallach Art Gallery, Columbia University.

Parks, Janet. 2001. Génesis del *Ensayo sobre la construcción cohesiva* de Rafael Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera: 173–175.

Pereda Bacigalupi, Angel. 1951. *Bóvedas tabicadas. Cálculo y ejemplos resueltos* Santander: Editorial Cantabria.

Plo y Camín, Antonio. 1767. *El Arquitecto práctico, civil, militar y agrimensor...* Madrid: Imprenta de Pantaleón Aznar (ed. facs. Valencia: Librería París-Valencia, 1995).

Ramazotti, Luigi. 2001. La cúpula para San Juan el Divino de Nueva York de Rafael Guastavino. En *Las bóvedas de Guastavino en América*, S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 187–200.

Rankine, W. J. M. 1864. *A Manual of Applied Mechanics.* 3ª ed. London: Charles Griffin (1ª ed. 1858).

Rieger, P. Christino. 1763. *Elementos de toda la architectura civil.* Madrid: Joachim Ibarra.

Rondelet, Jean. 1834–48. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir.* Paris: Chez Firmin Didot (1ª ed. Paris: 1802).

Rosell, Jaume e Isabel Serra. 1987. Estudis d'Esteve Terradas sobre la volta de maó de pla. En *Cinquanta anys de ciència i tècnica a Catalunya,* Barcelona: Institut dÉstudis Catalans: 23–33.

Rosell, Jaume. 2001. Rafael Guastavino Moreno. Ingenio en la arquitectura del s. XIX. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 201–215.

Rosenthal, E. E. 1988. *El palacio de Carlos V en Granada.* Madrid: Alianza Forma.

San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y Uso de Architectura. Primera parte.* Madrid: s.i. (ed. facs. Madrid: Albatros, 1989).

Schwedler, J. W. 1866. Die Konstruktion der Kuppeldächer. *Zeitschrift für Bauwesen,* 16: 7–34, lám. 10–14.

Sotomayor, Joaquín de. 1776. *Modo de hacer incombustibles los edificios sin aumentar el coste de la construcción. Extractado del que escribió en francés el Conde de Espié.* Madrid: Oficina de Pantaleón Aznar.

Swain, George F. 1927. *Structural Engineering. Stresses, graphical statics and masonry*. New York: McGraw-Hill Book Company.

Tarragó, Salvador. 2001. Las variaciones históricas de la bóveda tabicada. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 217–240.

Tomlow, Jos. 1989. *Das Modell. Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güell.* Stuttgart: Institut für leichte Flächentragwerke. Universität Stuttgart.

Tomlow, Jos. 2001. La bóveda tabicada a la catalana y el nacimiento de la «cerámica armada» en Uruguay. En *Las bóvedas de Guastavino en América*. S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: 241–251.

Torroja, Eduardo. 1956. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.

Tourtay, C. 1885. Sur l'influence des joints dans la résistance à l'écrasement des maçonneries de pierres de taille. *Annales des Ponts et Chaussées,* 2: 582–592.

Truñó, Ángel. 2004. *Construcción de bóvedas tabicadas,* S. Huerta, J. L. González y E. Redondo (eds.). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

## Adenda

Durante la última fase de corrección de las pruebas de imprenta he tenido noticia de tres libros sobre Guastavino que, si bien no he podido usar, creo que deben ser reseñados:

Guastavino IV, Rafael. 2006. *An architect and his son. The inmigrant journey of Rafael Guastavino II and Rafael Guastavino III.* Westminster, Maryland: Heritage Books.

Gulli, Riccardo. 2006. *La costruzione coesiva*. *L'opera dei Guastavino nell'America di fine Ottocento*. Venezia: Marsilio.

Ochsendorf, John A. *Guastavino vaulting: The art of structural tile*. New YorK: Princeton Architectural Press. (en prensa)

# Ensayo sobre la construcción cohesiva

# Prefacio

En octubre de 1889, a petición del eminente y conocido arquitecto, el Sr. T. M. Clark, la Society of Arts of Boston me concedió el honor de invitarme a describir lo que la observación y la experiencia me habían enseñado en relación con el sistema de bóvedas que en ese momento estaba construyendo en la nueva Biblioteca Pública de su ciudad, en Copley Square.

Mi primera intención era, para evitar un exceso de presuntuosidad, explicar simplemente mi obra práctica, y no entrar en el escurridizo terreno del análisis y la teoría. Pero dos razones me obligaban a no hacerlo así, y a ocuparme también de esta última.

La primera y más importante razón era que al construir una bóveda con este sistema, o cualquier elemento en el sistema cohesivo, surgen dos problemas. Uno se refiere a la estabilidad de la estructura una vez terminada; el otro, el fundamental, a su estabilidad durante la construcción. Sabemos que una construcción cohesiva será estable cuando haya fraguado; aunque construirla pueda suponer un problema insuperable. No se trata sólo de levantar un muro o un arco sobre una sólida cimbra, donde un ladrillo se sienta sobre otro ladrillo, o una piedra sobre otra piedra, y donde cualquier defecto que aparezca es fácil de corregir o cambiar. Una estructura, normalmente exenta, siempre produce compresiones y empujes inclinados u horizontales y representa un serio problema, pues, si bien

su resistencia va a depender fundamentalmente de la cohesión, en el momento de la construcción carece de ésta. Por lo tanto, consideré necesario estudiar cuidadosamente el asunto. No fue una tarea fácil, sobre todo cuando las instituciones académicas y los libros podían enseñar poco o nada sobre el tema.

La segunda razón era el recuerdo de que, antes de mis quince años de experiencia como arquitecto, había pasado varios años en el pupitre de estudiante de los institutos, universidades y academias, y mis eminentes profesores tendrían derecho a comprobar si había dejado que mis libros y apuntes cogieran polvo. También reflexioné sobre el hecho de que no se pueden explicar cuestiones prácticas, o tener convicciones, sin basarse en ciertas razones. Estas razones forman la teoría científica que estaba obligado a construir para poder ser convincente, y también para tener cierta garantía de que mis empleados trabajarían con seguridad. Por tanto, se precisaban herramientas científicas, y también el coraje de afrontar la difícil situación de tratar de explicar, con mis limitados medios, los aspectos teóricos. Es probable que estas herramientas sean primitivas, como normalmente sucede con las cosas nuevas, pero perfeccionarlas es misión de los profesores, a quienes dirijo este ensayo para su terminación. En efecto, el conocimiento que pueda poseer sobre esta materia se debe, no tanto a mis estudios e investigaciones, como al saber de mis distinguidos maestros en la Escuela de Barcelona, don Juan Torras y don Elías Rogent, de los que guardo una grata memoria, y que me instruyeron y me interesaron en el estudio de las artes y las ciencias aplicadas, llamándome especialmente la atención sobre este sistema de construcción, entonces en estado embrionario.

Finalmente, quisiera señalar la ayuda desinteresada que he recibido de los más distinguidos arquitectos americanos, gracias principalmente a su inmediata comprensión del hecho de que esta nueva construcción representa el renacimiento de un sistema antiguo y noble, en desuso durante varios siglos, pero aplicado ahora a las necesidades de nuestra época. Su interés me ha animado a publicar en forma de libro las conferencias a las que me refiero, con la esperanza de que merezcan la aprobación de todos los interesados en el arte de la construcción.

# 1
# Introducción

En Barcelona reside la familia Muntadas, a cuyos miembros se considera auténticos representantes de la aristocracia industrial de Cataluña. Todos ellos son, o han sido, industriales, y emplean en total más de diez mil personas en sus blanqueadoras, fábricas y plantas de teñido e impresión en las ciudades de Barcelona, San Martín, Sans, Girona y Ripoll. Un miembro de esta familia posee una rica y extensa propiedad en la provincia de Zaragoza que durante siglos perteneció a los monjes y que recibe el nombre de Monasterio de Piedra. Este terreno tiene una extensión de unas 20.000 Ha, y los edificios que en él se levantan, iglesias, conventos y el palacio del abad, de distintos periodos del arte románico, gótico, renacentista y llegando hasta a la época actual, ocupan casi 2 Ha. El propietario, D. Federico Muntadas (que es un gran literato y piscicultor), vive allí con su familia durante gran parte del año. Recibí su invitación para visitar esta propiedad a través de sus tíos D. José y D. Ignacio Muntadas, que pensaban convertir el inmenso convento en una residencia de verano.

En octubre de 1871 visité esta finca, que está a unos seis kilómetros de la estación de Alhama de Aragón, pueblo conocido por sus fuentes termales. Aquí, en este Monasterio de Piedra, pude ver una gruta inmensa, una de las obras más sublimes y extraordinarias de la naturaleza. Imagínese la Trinity Church, de Boston, cubierta por una enorme bóveda natural, soportada por muros de la misma

naturaleza, con estalactitas de todas las formas y tamaños suspendidas del techo como grandes arañas. Por pavimento, un lago, que recibe la luz únicamente a través de un gran ventanal o apertura, como el rosetón de una catedral, situado bajo la cascada de agua del río Jalón, su constructor, que pasa sobre la bóveda y se precipita más de sesenta metros tomando en su caída la forma de una «cola de caballo» que es como se la conoce. Acababa de dejar Barcelona, después de haber concluido varios edificios, entre ellos las grandes fábricas de los hermanos Batlló, y creía haber realizado una importante aplicación del sistema cohesivo. Pero ante este gran ejemplo de arquitectura natural, me di cuenta de lo pequeño e insignificante que había sido mi trabajo.

Mientras contemplaba la cascada de agua en aquella inmensa estancia, me invadió el pensamiento de que todo ese espacio colosal estaba delimitado por un único elemento constituido por una sólida masa de cimientos, muros y techo, y de que se había construido sin cimbras y sin necesidad de transportar pesadas piedras o vigas sobre grandes andamiajes; un todo compuesto de partículas colocadas unas sobre las otras, tal como la naturaleza las había dispuesto. Desde ese momento quedé convencido de que había mucho que aprender del gran libro llamado Naturaleza, nunca suficientemente estudiado, y de que nuestro habitual sistema constructivo era muy pobre, a pesar de que poseíamos el material necesario para realizar esa clase de edificios siguiendo principios naturales. Entonces comprendí por qué mi distinguido profesor de construcción, D. Juan Torras, dijo un día: «El arquitecto del futuro construirá imitando a la naturaleza, ya que es el método más racional, duradero y económico». Esta gruta es realmente un magnífico ejemplo de la construcción cohesiva. ¿Por qué no habíamos construido aplicando este sistema?

Sabía que en el sur de Europa y en Asia existían muchos edificios levantados siglos atrás utilizando el sistema cohesivo. Se pueden citar algunos de los arcos de triunfo romanos, el Panteón, la cúpula de Santa Sofía, la cúpula de la catedral de Zamora, y otros en Asia y también en las construcciones árabes medievales. La mayor parte de estas construcciones son de hormigón; algunas con paramentos de mármol u otro tipo de piedra, rellenos de hormigón en su interior, y otras enteramente de hormigón. Mi entusiasmo por el sistema cohesivo me condujo a las primeras tentativas realizadas con hormigón en masa. Pero pronto descubrí

que una construcción abovedada se ejecutaría mejor con ladrillos que con hormigón —esto es, cemento mezclado con fragmentos de piedra, grava o arena, de acuerdo con las necesidades de la época. Me refiero a ladrillos recibidos con mortero de cemento siempre que el material y el proceso sean los adecuados. Como consecuencia de esta experiencia, las fábricas Batlló (1869 y 1870) se proyectaron con bóvedas de ladrillo y no de hormigón. De este modo me surgió la pregunta de cuál sería el mejor sistema: el de la construcción cohesiva basada en el hormigón o la basada en el ladrillo, tal y como se había utilizado en los forjados y techos de las fábricas Batlló.

El hormigón es, ciertamente, una imitación de los conglomerantes de la naturaleza pero, como en ésta, requiere una gran masa y, sobre todo, tiempo para adquirir resistencia. El proceso me pareció demasiado lento y laborioso para esta época, en la que, por supuesto, se aprecia el valor del tiempo. Por otra parte, el sistema basado en el ladrillo podría no resultar deseable, teniendo en cuenta la excesiva cantidad de yeso que se requiere. Además estaba el agravante de la calidad irregular del cemento Portland disponible en el mercado. Estas dos dificultades eran más que un obstáculo: eran una carencia.

Con estas ideas y condiciones comencé a trabajar en Barcelona, empezando por mi propia residencia en la confluencia de las calles Aragón y Lauria. Realicé la primera experiencia sobre mí mismo, como un médico probaría su propia medicina, llevando a cabo mis ideas en una construcción de cerámica y cemento, prácticamente sin vigas, de cuatro plantas de altura. Después construí las blanqueadoras de Muntadas Aparicio y Cía., una fábrica de productos de lana merina y otros tipos de lana para Carreras y Hermanos, otra fábrica de lana merina, en Villa Franca, para Michans y Cía., la fábrica de cristal de Modesto Cassademunt, el teatro de Vilassar de Dalt, la fábrica de porcelana de Florens y Cía. y la fábrica de seda de Saladríguez. Así mismo apliqué el sistema en las casas privadas de los banqueros, D. Víctor Blajot y D. A. Anglada, entre otras.

Pero todo este trabajo fue practicamente empírico. No tenía la sanción técnica necesaria, mas ¿cómo era posible tenerla? El espesor de las bóvedas se determinaba por intuición y experiencia, como un hábil herrero decide el tamaño de las piezas que fabrica, o un buen marino el grosor de una soga o un aparejo. Pero, ¿es esa una actitud científica?, ¿puede haber alguna garantía basándose sólo en la

intuición y la experiencia? Por otro lado, cabría preguntarse si hubiese sido posible calcular algo en el embrionario estado de la fabricación de cementos hace quince o veinte años, cuando ningún fabricante era capaz de garantizar las características de su propia marca a causa de la dificultad de obtener homogeneidad. Cada fabricante tenía su propia fórmula y, en consecuencia, el mercado no podía abastecerse con una cantidad suficiente de cada marca para realizar ensayos de resistencia sobre los que basar los cálculos. No había certeza de poder garantizar siempre, en cualquier mercado, la calidad de cemento sobre la que basar nuestro coeficiente de resistencia.

Ésa era la situación en España, realmente en toda Europa, hace quince o veinte años, y todavía se mantiene hoy en muchos países. Por fortuna, los planos de los edificios y fábricas mencionados fueron enviados a la exposición de Filadelfia de 1876. El éxito obtenido y el gran incendio de Chicago, que hizo mella en todas las mentes europeas, me convenció de que este país era el lugar adecuado para el desarrollo del sistema cohesivo. Pero no llegué a América hasta 1881.

No había transcurrido mucho tiempo desde mi llegada cuando me di cuenta de la necesidad de estudiar los métodos, materiales y recursos americanos. A este trabajo dediqué cinco años. Era absolutamente imprescindible estar bien informado, en particular en todo lo relacionado con las bóvedas tabicadas. En primer lugar sobre el cemento, que es el componente esencial; en segundo lugar, sobre la ejecución de las bóvedas, ya que un fallo en esta fase haría peligrar las vidas de los trabajadores; y en tercer lugar, porque al utilizar las bóvedas la construcción debía proceder con gran rapidez de modo que los suelos pudieran usarse en poco tiempo. En resumen, era imprescindible conocer exactamente con qué material y en qué condiciones iba a trabajar.[1]

Traté de interesar en el sistema a arquitectos y constructores importantes. Pero algunos parecían considerarlo un sueño, o pensaban que era un visionario, mientras otros, más benevolentes, decían que en España o Italia podría ser útil, pero nunca en este país, tan diferente en clima, métodos y necesidades.[2]

Por otro lado, la fabricación de rasillas aquí era casi imposible: artesanalmente resultaría muy cara y, con maquinaria, tal vez demasiado laboriosa e inútil. Por lo tanto, los obstáculos y dificultades parecían insuperables, y casi perdí la esperanza.

Afortunadamente, el trabajo y la perseverancia son dos grandes factores para alcanzar el éxito. La publicación de algunos trabajos artísticos en revistas recibió buena acogida, y gané algunos concursos para edificios semipúblicos de Nueva York que me dieron la oportunidad de comenzar, con cierta autoridad, una serie de ensayos y experimentos con rasillas importadas.

Tras cumplir los compromisos con mis clientes, mi primera obra construida con este sistema a prueba de incendios en América fue una casa privada de cuatro plantas en la calle 78 de Nueva York, en 1886, con rasillas americanas. Durante el mismo año comencé a construir el interior del Club Arion, en la calle 59, cuya comisión de obras aceptó mi propuesta al darse cuenta que con mis bóvedas podían ahorrarse en sólo dos plantas más de 5.000 dólares, en relación con el sistema habitual de protección contra el fuego.

Desde entonces he estado construyendo en Nueva York, levantando forjados con bóvedas en varias estructuras diferentes, entre ellas las de la residencia de W. Fellows, Esq., en Montclair, el edificio Corbin en la esquina formada por las calles John y Broadway, la estación de la compañía eléctrica de iluminación Edison, en las calles 26 y 29 de Nueva York, etc.

Movido por estos alentadores resultados, evidentes por el número de contratos, en julio de 1889 puse todos mis proyectos en manos de una empresa, que tomó el nombre de Guastavino Fireproof Construction Company (Compañía Guastavino de Construcciones a Prueba de Incendios). Sin embargo, si el sistema se ha hecho popular no debe su fama al nombre, sino a su flexibilidad de aplicación y a sus méritos. En la actualidad tengo el orgullo de contemplar un sistema de construcción fundado sobre principios sólidos y razonables, que hace tan sólo cuatro años se consideraba un sueño, y que dos años después se mencionaba en un prestigioso libro técnico como una simple curiosidad. Es una gran satisfacción para mí poder decir que todos los grandes obstáculos que dificultaban mi trabajo han sido por fin superados.

# 2
# Historia

La bóveda tabicada no es un elemento totalmente desconocido. Es tan antiguo como el sistema cohesivo, y tal vez tanto como el opuesto de éste, al que puede llamarse sistema por gravedad. Aunque en la antigüedad se utilizó el sistema cohesivo, incluyendo las bóvedas tabicadas, después de alcanzar su apogeo en la Edad Media fue desapareciendo a medida que se aproximaba la civilización moderna y el Renacimiento.

¿Se debió esta desaparición al hecho de que tras esta gran etapa edificatoria los arquitectos dejaron de ser constructores? Tal vez la causa de la desaparición de esta forma de construcción en Europa fue la decadencia de la influencia de la arquitectura oriental, después de la gran era clásica de los árabes, o más bien de los arquitectos hispano-musulmanes. Éstos sabían cómo decorar la construcción y cómo construir la decoración en el sistema cohesivo, igual que lo habían hecho en piedra siglos atrás los griegos y los greco-romanos, en su propio estilo. Esto se manifiesta en su sistema de construcción por gravedad.

No tenemos un conocimiento preciso sobre estas cuestiones, y no podríamos reconocerlas o creer en ellas si no fuese por el hecho fundamental de la existencia de monumentos en el sistema cohesivo, testimonio de épocas de indudable progreso en el arte de construir.

Mucho se ha dicho últimamente en contra de las bóvedas y, especialmente, en contra de las bóvedas tabicadas. En primer lugar, contra su utilidad y aplicación, y en segundo lugar, sobre su origen y uso en la antigüedad. Se han emitido las ideas más erróneas y contradictorias en relación con esta forma de abovedamiento, como antes había ocurrido con los propios arcos, atribuidos a los romanos.

Hoy día, todo lo que conocemos es a través de levantamientos exactos de un gran número de monumentos antiguos, algunos en pie y otros en ruinas. A partir de ellos podemos reconstruir la verdad e inferir su historia. De este modo podemos decir que el uso común de bóvedas de ladrillo, piedra o tabicadas, así como el del arco y su origen, es muy antiguo. Es anterior a los romanos, que no hicieron sino perfeccionar esta forma de construcción generalizando su empleo y dándole un carácter más o menos estético, que antes no había tenido, ya que el arco y la bóveda se habían utilizado para satisfacer una simple necesidad constructiva cuando no se podían conseguir losas suficientemente grandes para cubrir el espacio. Por esta razón apareció el arco en el sistema por gravedad y la bóveda tabicada en la construcción cohesiva.

## Egipto

En una tumba situada en las proximidades de la llamada Ciudad de los Sepulcros, cerca de Tebas, existe una bóveda elíptica construida con ladrillos crudos. Tiene 2,50 m de luz y 1,42 m de altura, medida desde los arranques. Entre los jeroglíficos que adornan este monumento puede leerse el nombre de Amenofis. Por tanto debe pertenecer a la época de la XVIII dinastía, datada unos quince siglos antes de nuestra era. Esto en lo que se refiere a las bóvedas de ladrillo en general.

Otro ejemplo en relación con la bóveda tabicada. En una de las pirámides de Egipto, en Gizeh, aparece un arco de ladrillo crudo en una tumba descubierta por Campbell (Fig. 1). Estos ladrillos miden 17 × 12,6 × 50 cm. Con el fin de darles la forma necesaria se entiende que hubo que curvarlos antes de que se secasen. La construcción muestra claramente que el ladrillo de plano se empleó con la intención de reducir el número de piezas, cubriendo el espacio con el menor número de juntas posible. Así, para dar más resistencia y cohesión, los ladrillos se co-

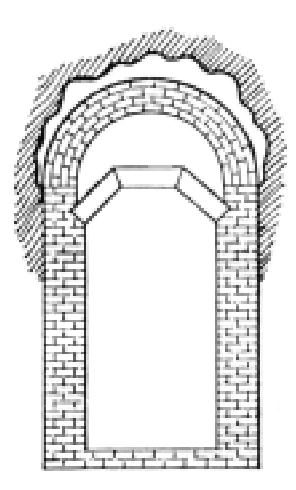


Figura 1
Arco de ladrillo crudo (Gizeh, Egipto)

locaron en cuatro hojas, una sobre la otra, matando las juntas y de este modo se consiguió un arco sin juntas.[3]

En este ejemplo puede verse que la construcción cohesiva, como el arco tabicado, y el arco en general, simplemente nació, si se puede decir así, y no es un invento particular. Tampoco tuvo su origen en una civilización determinada; fue sencillamente el fruto de una necesidad, un recurso espontáneo desde los tiempos más remotos. Estos hechos demuestran que ni las bóvedas de ladrillo, ni las bóvedas de piedra, ni las tabicadas pueden atribuirse a una civilización concreta. Circunstancias similares motivaron su aparición en cada país.

## Asiria

Los asirios perfeccionaron la fabricación del ladrillo. Asentandos entre los ríos Tigris y Eúfrates, y con abundante arcilla a su disposición, así como asfaltos y betunes que usaban como combustible, tuvieron la idea práctica de cocer la arcilla y sustituir el ladrillo crudo por ladrillo cocido. Para ello necesitaban hornos y, para cubrirlos sin madera o piedra, usaron ladrillos y terracota. Así surgieron las formas cupuliformes y cónicas que utilizaron en esos hornos.

Los hornos para la fabricación del ladrillo eran grandes cúpulas construidas con ladrillos a veces de grandes dimensiones. En algunas de sus obras los ladrillos se sentaban horizontalmente, y se terminaba cada hilada con un vuelo de unos 2,5 cm (Fig. 2). De esta manera se trazaba el perfil del arco.[4]

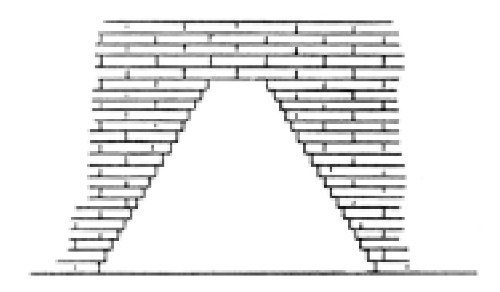


Figura 2
Aparejo de los ladrillos de las bóvedas asirias

Los asirios concedieron gran importancia al acabado de sus ladrillos, posiblemente para mejorar su cohesión. Por ejemplo, las dimensiones de los ladrillos empleados en la biblioteca del palacio de Khorsabad y en el palacio de Nimrod tenían aproximadamente 35 × 32 × 7 cm.

En los jardines de Semiramis, en Babilonia, y en las galerías subterráneas bajo el Eúfrates todas las bóvedas están construidas con ladrillos de gran tamaño.

## Grecia y Roma

Los griegos y los romanos no superaron a los asirios en la utilización del ladrillo. La obtención de arcilla y combustible era difícil, y su construcción era de piedra. En particular los romanos mostraban una marcada predilección por la piedra y el hormigón, que usaron con maestría, tanto en los arcos de triunfo y puentes, como en las construcciones militares y urbanas, tales como cloacas. Muestra de esta preferencia es que en Valencia las cloacas romanas son de piedra y hormigón aunque la región es rica en arcilla. Son de gran tamaño, y por ellas podría pasar fácilmente un carruaje. El acueducto de Segovia y las murallas de la ciudad de

Tarragona son otros ejemplos que de nuevo ponen de manifiesto su predilección por la piedra y el hormigón. Hay que destacar del primero: una estructura magnífica y asombrosa, y un modelo de equilibrio estático.

Es necesario señalar que cuando los romanos emplearon el ladrillo fue normalmente a modo de pequeñas dovelas, con juntas radiales, como se puede ver en el anfiteatro Flavio o Coliseo. No sólo en las primeras etapas de la construcción de este edificio, sino cuando se reconstruyó posteriormente, el ladrillo se empleó como dovela en bóvedas de rosca.

Los únicos ejemplos que parecen haber existido de obras abovedadas, o tabicadas, con el ladrillo colocado de plano análogamente al ejemplo mostrado en la figura 1 (más arriba), son probablemente los de las termas de Caracalla. El arquitecto encontró dificultades en la iluminación de la parte central, que sólo podía recibir luz a través de perforaciones en las bóvedas. Pero esto las hubiera debilitado y de haberse construido en ladrillo, como las del Coliseo y otros edificios, se les debería haber dado un gran espesor y hubiesen requerido enormes estribos. Parece que, finalmente, el resultado deseado se obtuvo rematando el intradós de las bóvedas con roscas de ladrillo y bóvedas tabicadas, construidas supongo con cementos puzolánicos (de Pozzuoli) que, aunque de fraguado lento, eran buenos, y utilizando cimbras que soportasen las bóvedas hasta el fraguado del mortero. Pero de esto no podemos estar seguros, como se puede deducir del siguiente párrafo tomado del tratado sobre bóvedas y puentes de Samuel Ware:[5]

> Recordar el Baño Solar de Antonius Caracalla en el momento actual, cuando nos atribuimos tantos méritos por la invención de los puentes de hierro, puede servir para reducir en parte nuestro entusiasmo. Era un edificio circular de 33,8 m de diámetro cubierto por una cúpula de *cobre y latón*.

Espartiano dice de él:

> Reliquit thermas nominis sui eximias quarum cellam solearem archtecti negant posse ulla imitatione qua facta est fieri, namex aere vel cupro, cancelli superpositi esse dicuntur, quibus concameratio tota concredita est; et tantum est spatii ut idipsum fieri negent potuisse docti mechanici.[6]

Según lo anterior parece que «cancelli» son *nervios* y «concameratio» *chapas* similares a las que pueden verse en nuestros puentes de hierro. A partir de esta descripción histórica citada por Samuel Ware, se deduce que, aunque las cúpulas y bóvedas pequeñas se hubieran construido tabicadas, la gran cúpula no.

## La Edad Media

La época en que se produjo el verdadero desarrollo del sistema cohesivo y de la cúpula fue la Edad Media, pero no ha dejado ejemplos importantes de bóvedas tabicadas, con los ladrillos apoyados de plano sobre la cimbra. No obstante, debemos llamar la atención sobre la construcción de arcos y cúpulas en la Persia árabe y musulmana, un país donde se había desarrollado una nueva y poderosa civilización en el mismo lugar en que los asirios dejaron la huella de su tradición cerámica —una civilización que agoniza bajo la gran cúpula de Santa Sofía.

La cúpula fue la forma dominante en sus monumentos;[7] y como la civilización oriental tuvo gran influencia en el antiguo Bizancio, no sólo transmitió a los bizantinos la riqueza de sus colores y decoración, sino que sentó la base de nuevas ideas en las artes arquitectónicas, hasta el punto de fundamentar los ejemplos clásicos del sistema cohesivo.

El mayor desarrollo se produjo en Córdoba y Granada, aunque el modelo más acabado y de mayor tamaño de cúpula cohesiva fue la de Santa Sofía, construida bajo la influencia de esta naciente civilización. Las cúpulas de Persia están todas construidas sobre muros de ladrillo, formando una continuación del mismo material.

Desde la construcción de la cúpula de Santa Sofía hasta el Renacimiento se construyeron varias cúpulas según el principio cohesivo. Las cúpulas más importantes son las de las mezquitas de Solimán II, del sultán Ahmed y de los Santos Apóstoles, en Constantinopla; la de Santa María de Rávena; San Marcos, en Venecia, y la de la catedral de Zamora, una de las más bellas de Europa.

En época posterior, en el Renacimiento, destacan las de Santa Maria del Fiore, la capilla de los Medici y el baptisterio de Florencia; S. Agustín y S. Pedro del Vaticano, Roma; la Madonna della Salute, Venecia; Santa Genoveva, París; San

Pablo, Londres; la Real Capilla de los Desamparados (Fig. 8) y la cúpula de los Escolapios, Valencia (Fig. 9).

Conviene aquí llamar la atención sobre una cuestión importante. Todas las cúpulas construidas hasta la época de Constantino se hicieron con ladrillo y hormigón, al estilo árabe, siguiendo los principios constructivos sin por ello alterar las formas estéticas. Sin embargo, en todas las cúpulas construidas después de esa época, comenzando por Brunelleschi en Florencia e incluyendo la cúpula de San Pablo de Londres, el perfil exterior, cada vez más acusado, no se corresponde con el interior. Esta discordancia de las cúpulas modernas se puede apreciar comparando la cúpula de Brunelleschi con la de San Pedro del Vaticano y San Pablo de Londres (Figs. 3, 6 y 7). El trasdós de la cúpula doble de Brunelleschi se adapta a la forma del intradós, sirviendo aparentemente el espacio intermedio sólo para evitar humedades y proteger así a la decoración interior, como permiten deducir los detalles de los nervios (Figs. 4 y 5). En la última cúpula mencionada, la de San Pablo (Fig. 7), la cúpula interior o decorativa es semiesférica, la segunda tiene la forma de un cono truncado y la tercera es la cúpula exterior. El conjunto no muestra una correspondencia entre las fases del proceso constructivo y el modo en que se aplican las formas estéticas.

Esta anomalía se debe al desuso de los morteros hidraúlicos de los romanos, árabes y bizantinos. Se perdió el arte de fabricar estos materiales que constituían la base de su construcción cohesiva. En la construcción de Santa Sofía los bizantinos emplearon arcilla cocida y lava del Vesuvio o piedra pómez.

### Renacimiento

A los arquitectos del Renacimiento, especialmente en Italia y España, les producían una enorme impresión las obras de los romanos, bizantinos y árabes, y quisieron imitar su osada construcción, pero no disponían ni del material ni de una mano de obra experimentada. Por eso emplearon yeso, y a partir de entonces la bóveda tabicada se difundió a lo largo de las costas del Mediterráneo, desde Murcia hasta Valencia, Barcelona y Génova, y a lo largo de la costa italiana hasta Nápoles. En todos estos lugares pueden encontrarse ejemplos de bóvedas tabica-

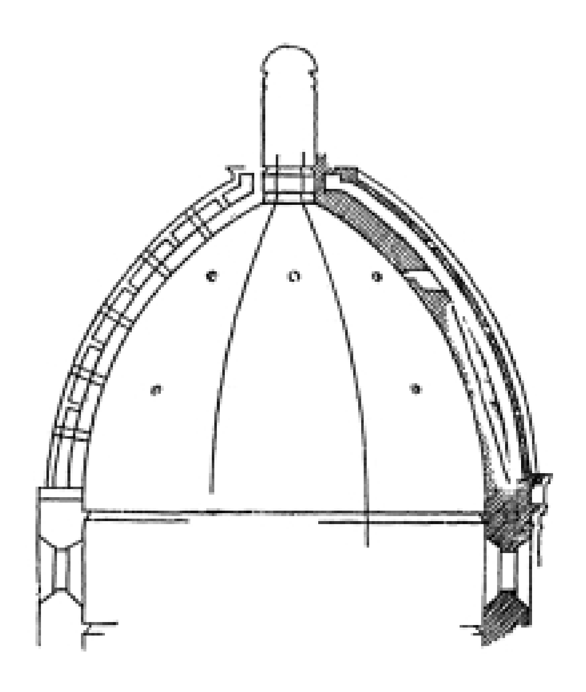


Figura 3

Cúpula de Santa Maria del Fiore de Brunelleschi (Florencia)

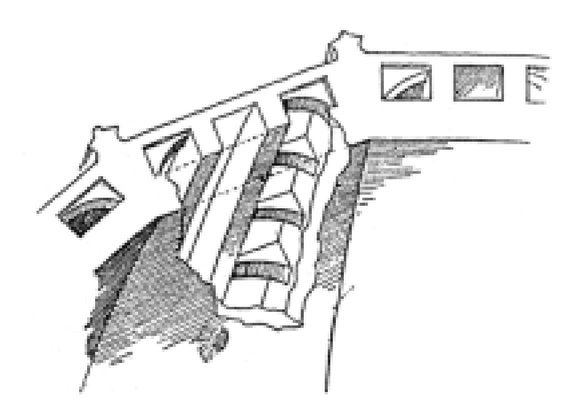


Figura 4

Detalle de los nervios de la cúpula de Santa Maria del Fiore (Florencia)

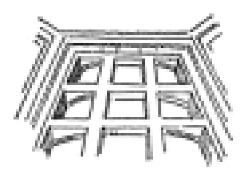


Figura 5
Detalle de los nervios en la base de la linterna de la cúpula de Santa Maria del Fiore (Florencia)

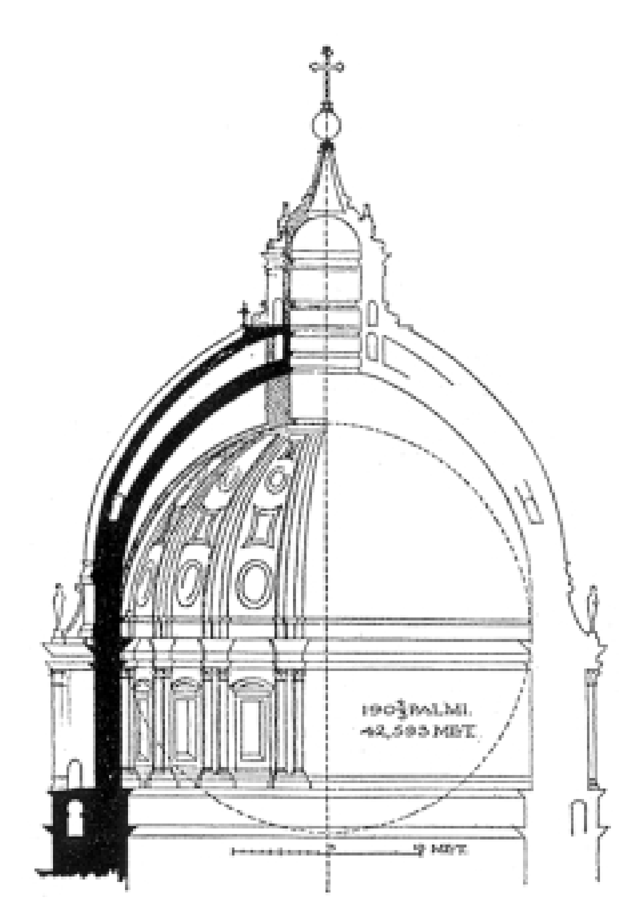


Figura 6
Cúpula de San Pedro de Roma, de Miguel Ángel

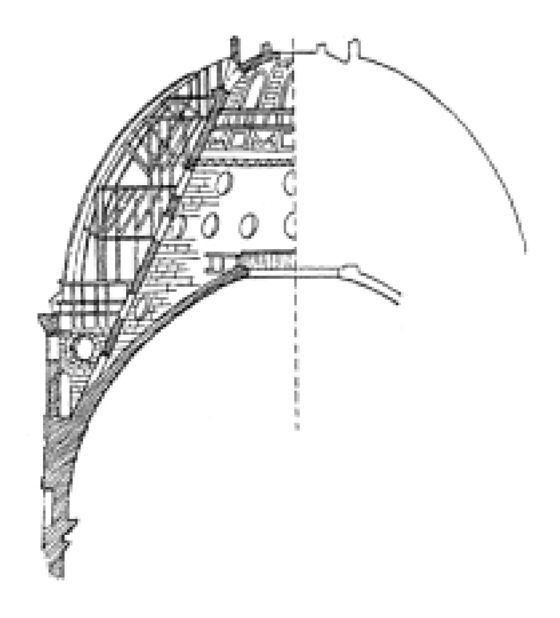


Figura 7
Cúpula de San Pablo de Londres

das. Esta época merece especial atención por los muchos datos que proporciona en ayuda de nuestro estudio.

Ya hemos dicho que cuando los arquitectos del Pontificado tomaron por modelo la construcción romana y bizantina para lograr la riqueza y la magnificencia exigida por aquella época, carecían del material y de la mano de obra experimentada necesarios. Les fue imposible imitarlos debido a que sólo disponían de cal común y yeso. La primera no se podía utilizar en construcciones similares a Santa Sofía, la catedral de Zamora o las cúpulas árabes. En cuanto al segundo, se dieron cuenta de que la gran expansión del yeso, que no cesa hasta estar completamente saturado —cuando pierde su poder de absorción— obligaba a los arquitectos a construir muros de enorme espesor. Además, cuando el yeso ha llegado al estado de saturación pierde su resistencia, desprendiéndose los ladrillos principalmente en los lugares donde el edificio está expuesto a la intemperie o sometido a estados alternos de humedad y sequedad. En consecuencia, su uso estuvo limitado a muros muy gruesos y a forjados de vigas y entablado de madera, sobre

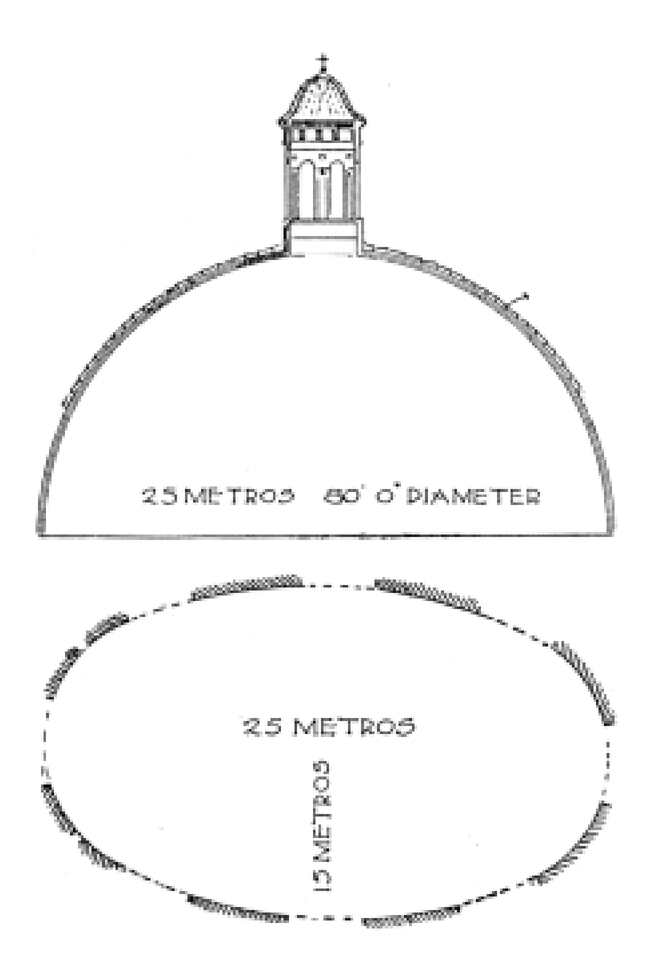



Figura 8
Planta y sección de la cúpula de la Basílica de los Desamparados (Valencia)

los cuales se colocaban tejas árabes en el caso de un tejado, o mortero y baldosas en el de una terraza.

En algunos casos las bóvedas tabicadas además de servir de techo formaban el suelo del piso superior. Entonces se componían de dos o tres capas de ladrillo y yeso, y un relleno de tabiquillos en los riñones que se nivelaba con cascote y mortero, y se remataba con baldosas.

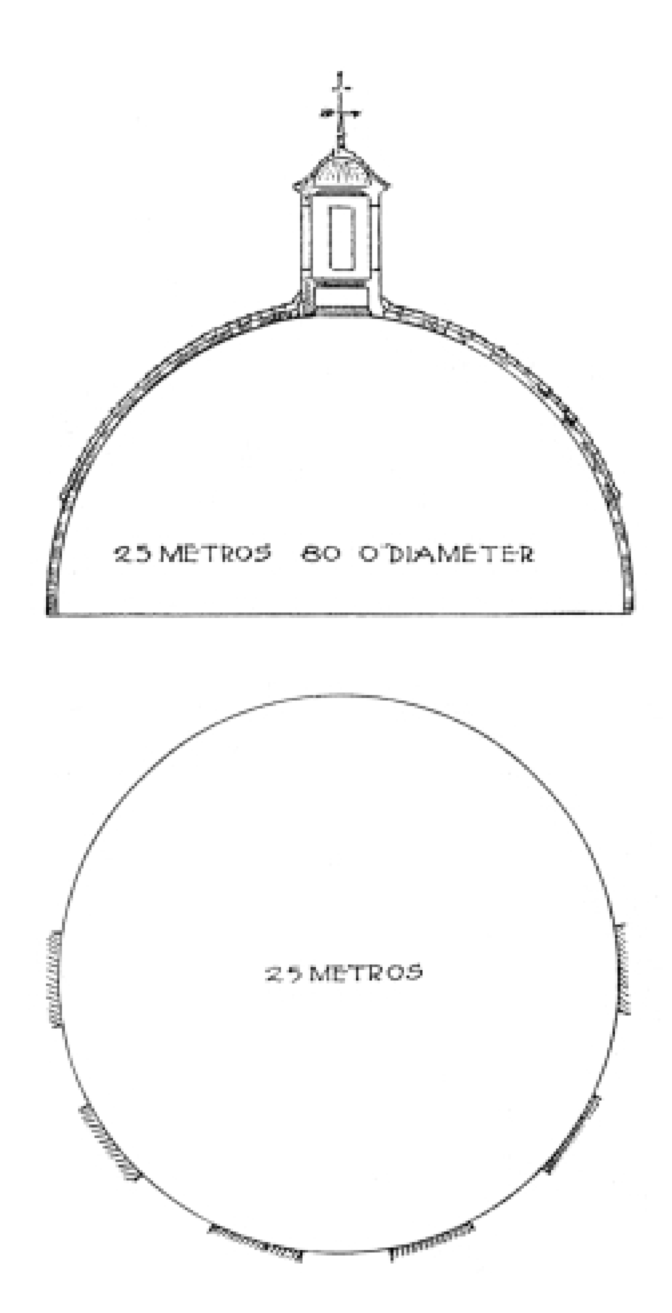



Figura 9

Cúpula de ladrillo con zuncho de hierro. Planta y sección de la cúpula de los Escolapios (Valencia)

Es necesario destacar que este tipo de construcción se utilizaba solamente en grandes edificios, tales como conventos, palacios e iglesias, donde los muros eran muy gruesos, de un tercio de la luz, y el carácter del edificio garantizaba la conservación de los tejados. De otro modo hubiera sido necesario parchearlos y repararlos cada pocos años. Pero en los edificios normales sólo se usaba para salvar pequeñas luces, de unos 45 a 50 cm entre vigas, con dos hojas de tres ladrillos cada una, colocados de plano sobre la cimbra; y así se han seguido utilizando hasta el día de hoy.

Concluyo aquí el repaso de esta forma de construcción en la antigüedad y el Renacimiento, y me ocupo ahora de la época moderna.

Como puede verse, todas las bóvedas tabicadas de la época renacentista existentes en Italia, y también en España, están construidas con yeso, que no cumple los requisitos de una buena construcción. Por consiguiente, es natural que ninguna academia técnica en España o Italia haya considerado seriamente este tipo de construcción empírica, proclive a accidentes lamentables. Francia e Inglaterra no se han tenido en cuenta aquí, porque como las otras naciones del norte de Europa, carecen de ladrillos de las dimensiones y calidad apropiadas a la construcción cohesiva. En efecto, los ladrillos tienen una pequeña superficie de contacto, de 10×20 cm, cuando, normalmente, en el sistema cohesivo se emplean ladrillos de tipo asirio, o los orientales, con dimensiones de 30 a 35 cm de longitud, 15 a 20 cm de anchura y 2,5 a 5 cm de espesor.

En España, donde se ha utilizado el sistema y aún se utiliza a mayor escala que en ningún otro país, no existen tratados, ni simples trabajos teóricos o una sencilla explicación científica de esta forma constructiva. Ni siquiera una explicación empírica para satisfacer al curioso.

El renacimiento de la construcción cohesiva se inicia con la generalización del empleo del cemento entre 1845 y 1850. El moderno cemento romano que Parker inventó y patentó en 1791 y 1796 era tan caro, y las condiciones de puesta en obra tan lentas, que tardó mucho tiempo en aplicarse en la edificación. Se llamó a este cemento, cemento de Parker, si bien su inventor lo llamaba «cemento romano». Otros cementos con la denominación Medina, introducidos poco tiempo después, tenían los mismos defectos. Aspdin patentó la fórmula del famoso cemento Portland el 21 de octubre de 1824. Le dio el nombre de Portland porque

cuando es de buena calidad y está alisado con la llana, resulta muy similar a la piedra Portland pulida.

Hasta el año 1868 los profesores de la Escuela de Barcelona, una de las más ilustres de Europa, en una ciudad donde se emplea el ladrillo más que en el resto del mundo, no comenzaron a prestar atención al modo de construcción cohesiva. Cuando lo hicieron ya se habían realizado importantes aplicaciones con él, y fue sólo para mencionar casualmente su resistencia y su posible utilidad. Pero no lo estudiaron, a pesar del hecho de que continuamente caminaban sobre forjados construidos con este sistema en el que se empleaba el yeso. Por otro lado, esta falta de atención se explica por la ausencia de cementos apropiados para este tipo de construcción en ese momento. Esta carencia y la inexistencia de una composición invariable para el cemento sobre la que basar los cálculos era uno de los principales obstáculos que surgían ante los arquitectos catalanes y valencianos.

La primera obra importante de este tipo construida en España fue, en 1868, la fábrica de Batlló en La Corts de Serria. Se compone de una serie de edificios que albergan 2.000 empleados, 1.000 telares y 64.000 husos. Después construí los otros edificios ya mencionados. En algunos casos el riesgo y el peligro ocasionado por la heterogeneidad de los materiales era tan evidente que los obreros tenían miedo de seguir adelante, obligándome a permanecer en las obras para inspirar confianza y garantizar su éxito.

El progreso experimentado en España, particularmente en Barcelona, por esta construcción especial, se debió principalmente a los fabricantes, y a los estudios y enseñanza sobre estas materias. Los profesores debatieron simultáneamente durante años cómo mejorar sus respectivas especialidades y cómo desarrollar nuevos sistemas prácticos de construcción sabiendo que la mejora del material traería el cambio y el progreso de la construcción. Pero sus nobles aspiraciones quedaron limitadas al no disponer de medios, por lo que debieron contentarse con recomendar las teorías de Vicat sobre el empleo de cementos y otras aplicaciones bien fundadas.[8]

No se hizo nada por investigar estas estructuras a las que me he referido y no se obtuvieron valores de resistencia. Éstos sólo pueden hallarse cuando dependen de materiales de regularidad matemática, y con aparatos precisos para determinar su fiabilidad. Sólo pueden obtenerse, además, en países en cuyo mercado existan

suficientes marcas garantizadas de cemento Portland de diferentes composiciones; donde se pueda usar ventajosamente la arcilla para este tipo de construcciones y exista regularidad de fabricación; y finalmente, después de realizar ensayos en donde dispongamos de potentes aparatos y puedan obtenerse valores de la resistencia de los materiales, como ha puesto de manifiesto nuestro propio trabajo en los últimos cinco años.

Debido a estas especiales ventajas parece que todo este trabajo experimental culminó en Estados Unidos, desarrollándose de forma natural en Nueva York y Boston, con ejemplos que no tienen rival en el mundo entero por su ligereza y resistencia. Vemos ahora que el movimiento iniciado en Inglaterra por el inapreciable Parker con las patentes de 1791 y 1796 —que pensaba había redescubierto los antiguos cementos romanos—, pasando después por las mejoras patentadas por Aspdin, el 21 de octubre de 1824, pudo alcanzar su culmen en Nueva York y Boston. Pero no sin la valiosa ayuda y confianza de los eminentes arquitectos Mac Kim, Mead & White, Buchman & Deisler, R. H. Robertson, F. H. Kimball, T. M. Clark, De Lemos & Cordes, A. H. Pickering, A. F. D' Oench y otros, cuya cooperación y apoyo merecen ser recordados en los anales del arte de la construcción.

# 3
# Teoría y coeficientes de aplicación

Podemos dividir la construcción de fábrica en dos tipos:

1) La construcción mecánica o por gravedad.
2) La construcción cohesiva o construcción por asimilación.

La primera se basa en la resistencia de cualquier sólido a la acción de la gravedad cuando es contrarrestado por otro sólido. De este conjunto de fuerzas, más o menos opuestas entre sí, resulta el equilibrio de la masa total, sin tener en cuenta el poder cohesivo del material existente entre los sólidos.

La segunda tiene por fundamento las propiedades de cohesión y asimilación de distintos materiales que, por una transformación más o menos rápida, imitan el proceso de formación de conglomerados en la Naturaleza.

Podemos dar otra definición más precisa y extensa para ambos sistemas, estableciendo que el primer sistema, mecánico, es aquél en el que todos los elementos pueden separarse uno a uno y después recomponerse de la misma forma o de una forma similar. A este tipo pertenecen las pirámides de Egipto y los templos griegos. En la construcción cohesiva, por el contrario, no se pueden separar los componentes sin destruir la integridad de la masa. A este sistema pertenecen los muros de ladrillo con mortero hidráulico de Babilonia y las bóvedas y cúpulas de

los asirios, persas, árabes, romanos y bizantinos, es decir, la construcción conglomerada de la Antigüedad y la Edad Media.

Como se ha dicho, las estructuras construidas por gravedad pueden desmontarse en cualquier momento. Así, la piedra o el ladrillo que ayer formaba parte de un templo o monumento dedicado a la memoria de un héroe puede formar parte mañana de los muros de un establo. Por el contrario, como los elementos de la construcción cohesiva no se pueden reutilizar en los nuevos edificios, sus ruinas inspiran respeto y veneración, y sólo la Naturaleza, con su lento pero seguro trabajo de desintegración, puede tomar el material de este tipo de construcción para su inmenso y eterno laboratorio.

Los materiales empleados en la construcción por gravedad requieren únicamente la propiedad física de la resistencia. En la construcción cohesiva los materiales no sólo deben reunir ciertas propiedades físicas, sino que es absolutamente necesario considerar las propiedades químicas de las sustancias empleadas. El empleo del sistema cohesivo se hizo imposible en muchos países porque carecían tanto del material como de los conocimientos necesarios. Sin embargo, todas las civilizaciones y naciones pudieron hacer uso del sistema por gravedad.

El material básico de la construcción cohesiva es un mortero que no requiera estar expuesto al aire para su fraguado, esto es, cal hidráulica y cemento, aunque en nuestro caso concreto debemos utilizar cementos de la calidad del Portland. La fórmula para la fabricación de este tipo de materiales y la manera de usarlos fue al parecer olvidada (posiblemente poco después de la caída del Imperio Romano), exceptuando ciertas prácticas en Oriente que pronto desaparecieron. Fue Parker quien redescubrió en 1791 la fabricación de cementos hidráulicos. No obstante las dos patentes de 1791 y 1796, no estaban del todo perfeccionadas. Además llegaron demasiado tarde para ser tomadas en cuenta por la corriente científica que a finales del siglo XVIII empezó a influir e impulsar las universidades y escuelas técnicas. En consecuencia los libros de texto utilizados no se refieren a otro que no sea el sistema por gravedad. Estas doctrinas o ideas prevalecen todavía, y constituyen hoy la base de nuestra enseñanza.

Nada se había escrito en relación con la construcción cohesiva aplicada a las bóvedas tabicadas. Esto se debía a la siguiente circunstancia, que merece la pena señalar. Desde el siglo XVIII, las naciones más avanzadas en cuanto a obras

científicas y literarias, y en las que más se había escrito sobre las ciencias aplicadas, eran Inglaterra, Francia y Alemania. Pero en estos lugares la forma errónea de sus ladrillos, y la pobre calidad de su construcción, proporcionaban con frecuencia el espectáculo de que al demoler los muros de cualquiera de sus edificios y retirar los ladrillos, éstos estaban tan limpios, sin mortero adherido a ellos, que podían usarse de nuevo en otros muros. ¿Podían los profesores y los científicos de estos países considerar seriamente la resistencia cohesiva, aunque supiesen de la existencia de ciertos cementos? Verdaderamente no es extraño que todos los profesores rigurosos se inclinasen sólo a dar coeficientes de resistencia para el sistema por gravedad, y todos sus libros y enseñanza se basaban en este sistema, con la excepción de los materiales que trabajan a tracción. Italia y España carecían de libros de texto propios en esta época; todos los que había eran traducciones de obras francesas e inglesas.

## Arcos tabicados

Empezaremos por investigar cómo trabajan este tipo de arcos. Un arco tabicado de una sola hoja de ladrillo o rasilla (Fig. 10) no es más resistente que un arco o bóveda construidos por el sistema de gravedad, ya que por bueno que el mortero pueda ser, hay una única junta vertical y los ladrillos o rasillas están trabajando como dovelas. Por tanto esta forma de arco pertenece al sistema por gravedad. Pero si colocamos otra hoja sobre la primera (Fig. 11), a matajunta y utilizando un mortero hidráulico, podemos contar con la acción de la fuerza cohesiva, es decir, el mortero colocado sobre el trasdós de la primera hoja se liga también a la hoja superior. Tan pronto como el cemento fragua, tendremos una resistencia a cortante de 0,9 N/mm$^2$ (17.820 pulgadas pie cuadrado) (Fig. 12, ensayo nº 4.873). De este modo introducimos una resistencia adicional en el arco que es característica del sistema tabicado. En el sistema por gravedad (Fig. 10), es únicamente la fuerza de la gravedad la que mantiene las dovelas en su sitio como consecuencia de los empujes recíprocos en sus juntas. Estas juntas no están protegidas, y cualquier reducción en su espesor provocada por los empujes, o por una carga sobre el arco, compromete el fraguado del mortero. Por esta razón en el sistema por gravedad el mortero de las juntas, aunque sea de cemento, sólo sirve como un

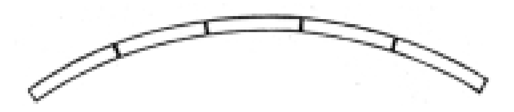


Figura 10
Bóveda tabicada de una hoja

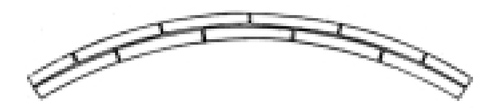


Figura 11
Bóveda tabicada de dos hojas

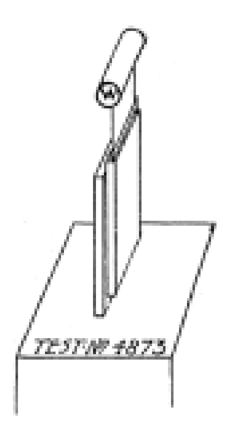



Figura 12
Ensayo de resistencia a cortante

«colchón», y no aumenta la resistencia del arco. Por el contrario en nuestro sistema cohesivo, con juntas matadas horizontalmente, y 0,9 N/mm$^2$ de resistencia a cortante, se impide por completo la disminución del espesor de las juntas verticales, como demuestran los siguientes hechos. Primero, podemos construir arcos de

6 m de luz con un espesor de tan sólo 7,5 cm utilizando una forma de 2,5 cm de espesor y desplazándola en cuanto se ha colocado una fila de ladrillos, que normalmente se realiza en quince minutos. Segundo, es frecuente ver a los obreros caminando sobre el arco libre de cimbras de cualquier tipo, pocas horas después de haberse construido. Finalmente, podemos correr la forma bajo la bóveda una vez terminada, lo que demuestra en la práctica que el arco ha tenido el reposo absoluto necesario para su asiento. Estas tres notables circunstancias son de gran valor para los arquitectos, ya que pueden incluirse en el pliego de condiciones y servir como prueba absoluta de la seguridad de la construcción.

Pero esta unión horizontal a matajunta entre las hojas, que supone una nueva resistencia adicional, no es la única ventaja importante del sistema. Hay otras, cuyos principios trataré de explicar.

Es evidente que si fuéramos capaces de construir una bóveda sin juntas, sería lo mejor, ya que no sufriría asientos; pero como el sistema por gravedad se compone básicamente de dovelas de piedra o ladrillo es necesario un cierto número de juntas. Consideremos un arco de ladrillo (Fig. 13) de 1,8 m de luz. Tendríamos unas 26 ó 27 juntas entre los ladrillos. Estas juntas, de 0,6 cm de espesor, suman unos 16 cm de mortero, que debe fraguar con todo el peso de la bóveda cargando sobre las cimbras. Pero las cimbras, al deformarse, transmiten la carga o la presión sobre el mortero, impidiendo así un buen fraguado, y elevando el empuje de la bóveda desde A hasta B (Fig. 13). Esto ocurre, en mayor o menor medida, en todas las bóvedas de ladrillo. Cuando esta bóveda tiene una flecha de sólo un diez por ciento de la luz es muy peligroso, ya que el perfil curvo mide muy poco más que su cuerda CD. El constructor o contratista, consciente de esto, siempre

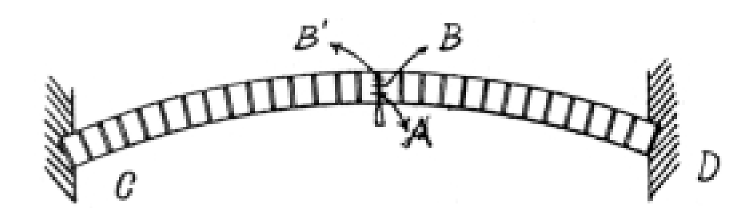



Figura 13
Arco de rosca de ladrillo

tiene miedo al retirar las cimbras, y antes de que el arquitecto lo sepa, hace descender mucho más que antes la posición del empuje, introduciendo a golpes en las juntas pequeñas cuñas de hierro o clavos, que después cubre con mortero para que no se vean. Ésta no es una buena práctica, ya que destruye la cohesión que aún pueda existir en las juntas, pero tiene la ventaja de liberar el ladrillo del mortero, lo que permitiría su reutilización en caso de desmontaje de la bóveda. En nuestro arco, también de 1,8 m (Fig. 14), sólo tenemos 13 juntas, de 0,6 cm cada una, es decir, sólo 8,2 cm de mortero. Dado que la bóveda sin juntas es la mejor, se preferirá la que tenga menos.

Hay otras ventajas igualmente importantes. Sabemos que en un arco la línea de empujes cambia de acuerdo con la posición de la carga. Esto significa que cualquier arco debe poder trabajar a flexión, esto es, debe resistir tracciones. Consideremos un arco construido con ladrillo de manera que pueda realizarse un ensayo de flexión (Fig. 15).



Figura 14
Arco tabicado de ladrillo

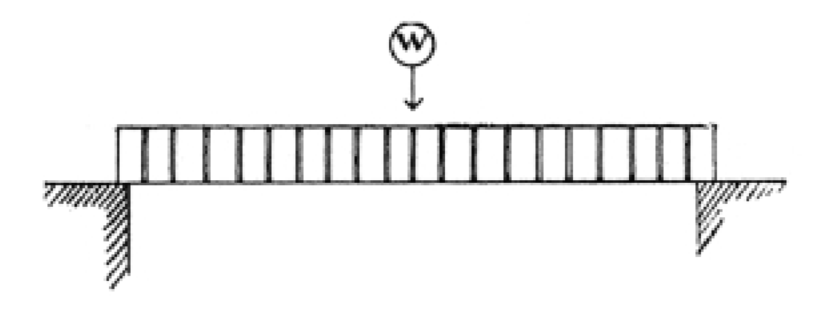



Figura 15
Arco adintelado de ladrillo

La resistencia a tracción depende de la cohesión de las juntas, esto es, de la resistencia a tracción del mortero. No obstante, ya se ha dicho que esta cohesión es muy pequeña en los arcos de ladrillo, y que el mortero se comporta, en muchos casos, como un simple colchón. Y aun cuando estas juntas tengan un buen asiento la tracción sólo igualará la resistencia cohesiva del mortero entre los ladrillos. En un buen mortero de cemento, después de diez días, esta resistencia es de sólo entre 0,5 y 1 N/mm$^2$, mientras que para nuestro arco tabicado los ensayos nº 4.875 y 4.876 muestran una resistencia a tracción, de 2 N/mm$^2$ a los diez días, y de 1,1 N/mm$^2$ a los siete días (Fig. 16).

Esto demuestra que la construcción cohesiva presenta las siguientes ventajas sobre el arco de ladrillo o cualquier arco erigido con una construcción por gravedad:

1º La protección de las juntas verticales y el consiguiente incremento de resistencia que se deriva de disponer las hojas matando las juntas horizontalmente.
2º El menor número de juntas verticales, que sólo suponen el cinco por ciento de la luz, mientras que en el arco de ladrillo llegan al diez por ciento.
3º La resistencia a flexión. Véase más adelante, el epígrafe «Análisis de algunas peculiaridades del sistema».

El resultado de estas ventajas es la sorprendente resistencia de las bóvedas tabicadas, de modo que al principio nadie puede comprender cómo pueden levantarse bóvedas de 4,5 a 6 m, con 7,5 cm de espesor y un diez por ciento de flecha,

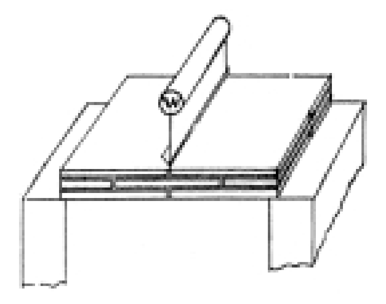



Figura 16
Ensayo de flexión de un elemento tabicado

como dijimos anteriormente, pudiendo retirar las cimbras y ponerlos en servicio en unas horas, cuando un arco de rosca de ladrillo con una luz de 1,8 m, 10 cm de espesor y un diez por ciento de flecha requiere cimbras pesadas y resistentes durante varios días. Además, un arco de rosca de ladrillo de estas proporciones no es seguro: para una luz de 1,8 m le corresponderían 20 cm de espesor, como todos los arquitectos y constructores saben.

Comparemos la seguridad entre arcos de ladrillo y tabicados. Un arco de ladrillo normal con mortero de cemento, de 1,4 m de luz, un diez por ciento de flecha y 10 cm de espesor se corresponde con un arco tabicado de 3 a 4,5 m de luz, 7,5 cm de espesor y una flecha del ocho al diez por ciento.

Todo lo que se ha dicho sobre los arcos de ladrillo en comparación con el arco tabicado se puede aplicar a los arcos de hormigón, especialmente en relación con el inconveniente de tener que utilizar pesadas cimbras y el fraguado imperfecto de los materiales. En arcos grandes el cemento ha de verterse lo suficientemente lento como para que cada tongada pueda fraguar con regularidad. El uso excesivo del apisonado mata parte del cemento. Ésa es la razón por la que durante cuarenta años se haya intentado construir sin éxito arcos de hormigón. Sólo en los de pequeño tamaño, donde los obreros pueden completar toda la luz del arco con una simple tongada de asiento uniforme, se han obtenido resultados satisfactorios; pero siempre utilizando más material del necesario.

Daré como ejemplo del uso del hormigón, su empleo en la cimentación de la fábrica de los hermanos Batlló. Determiné una primera capa de hormigón de cemento de 90 cm a lo largo de toda la cimentación y la colocación en la parte superior de cuatro hiladas de ladrillos de 15 × 30 × 4 cm, aproximadamente los mismos que utilizamos ahora. (Esto fue en 1869, hace veintitrés años). Ordené después hormigonar por capas sucesivas de 15 cm. El cemento fraguaba lentamente y sin embargo ese mismo día ya pude observar signos de cristalización. Al día siguiente, inspeccionando el trabajo del día anterior, me encontré con una masa de barro. Costó diez días de trabajo y muchos barriles de cemento, experimentando con diferentes marcas antes de descubrir la verdadera causa. Finalmente, fue necesario utilizar un mortero hidráulico compuesto por dos partes de cal, dos partes de arena y tres partes de polvo de ladrillo, para obtener un mortero hi-

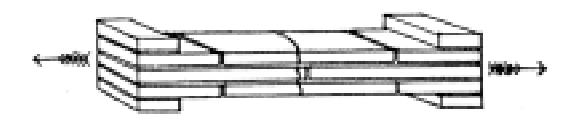


Figura 17
Ensayo de tracción de un elemento tabicado

dráulico lento. En efecto, el problema fue que el cemento requiere reposo durante un cierto periodo de tiempo para que fragüe; después verterlo en tongadas de 15 cm y apisonarlo, la masa, como resultado de esta agitación, pierde sus propiedades de cristalización. Esto puede observarse a la hora de colocar nuestros ladrillos. Dos minutos después de sentar el ladrillo en el arco, el cemento del lecho de mortero ha empezado a fraguar o cristalizar, y no puede modificarse o reutilizarse aunque tarde varias horas en fraguar.

## Ensayos de resistencia

En mayo de 1887 comencé a realizar una serie de experimentos con A. V. Abbott en el Departamento de Ensayos y Experimentos de la Fairbanks Scale Company, en Thomas Street, Nueva York, y obtuve algunos valores de la resistencia. Estos son los siguientes:

*Ensayos de compresión*

| | |
|---|---|
| Nº 4.817. 3 de mayo de 1887, ensayo de compresión, 5 días | 15,70 N/mm$^2$ |
| Nº 4.818. 3 de mayo de 1887, ensayo de compresión, 5 días | 11,20 N/mm$^2$ |

En éste último las cabezas no eran iguales.

| | | |
|---|---|---|
| Nº 4.869. 6 de junio de 1887, ensayo de compresión, 5 días | | 9,86 N/mm$^2$ |
| Nº 4.870. 6 de junio de 1887, ensayo de compresión, 5 días | | 20,08 N/mm$^2$ |
| | Total: | 56,84 N/mm$^2$ |

Resistencia media 56,84/4 = 14,21 N/mm$^2$

| | |
|---|---|
| Nº 7.475, 22 de octubre de 1889, ensayo de compresión, 1 año | 22,68 N/mm$^2$ |
| *Ensayo de flexión* (Fig. 16) | |
| Nº 4.871. 6 de junio de 1889 | 0,62 N/mm$^2$ |
| *Ensayo de tracción* (Fig. 17) | |
| Nº 4.875. 7 de enero de 1887 | 1,97 N/mm$^2$ |
| *Ensayo de cortadura* (Fig. 12) | |
| Nº 4.873. 6 de junio de 1887, en cemento Portland | 0,85 N/mm$^2$ |
| Nº 4.872. 6 de junio de 1887, en yeso de París | 0,23 N/mm$^2$ |

## Fórmula general para arcos escarzanos

Para los arcos escarzanos que soportan una carga uniforme es de aplicación la siguiente fórmula, cuya explicación se dará más adelante:[9]

$$A \cdot \sigma_c = \frac{Pl}{8f} \qquad (1)$$

$A$ = área de la sección transversal en la clave del arco o bóveda, por metro, en mm.
$\sigma_c$ = resistencia a compresión 14,21 N/mm$^2$ de carga de rotura.
$P$ = carga total en kN (peso propio más sobrecarga).
$l$ = luz en metros.
$f$ = flecha del arco o bóveda en metros.

Usamos la fórmula (1) para obtener el espesor necesario en la clave del arco o bóveda sometido a una carga uniforme, incluido su propio peso. Después obtenemos la línea del trasdós del arco de una forma gráfica, derivada de la fórmula propuesta por Dejardin[10] para trazar el trasdós de arcos o bóvedas equilibrados, que da la sección del arco en los arranques.

Esta fórmula es:

$$NM = \frac{e}{cos\ a}\ , \qquad (2)$$

general para cualquier arco semicircular o escarzano. Así, considerando como primer caso un arco escarzano con $a = 60º$, resulta que $a$ es igual a un tercio del arco semicircular con un radio vector V del trasdós igual a ON, (Fig. 18); $r$ es el radio del intradós OM; $e$ el espesor en la clave, AB; y $a$ el ángulo que cualquier radio forma con la vertical OA. Por lo tanto, la fórmula del espesor en la clave es, en la unidad de longitud considerada:

$$e = \left(\frac{Pl}{8f}\right) \cdot \frac{1}{\sigma_c} \qquad (3)$$

y la fórmula del espesor en el arranque es:

$$\frac{e}{cos\ a}\ . \qquad (4)$$

El procedimiento gráfico es el siguiente (Fig. 18):

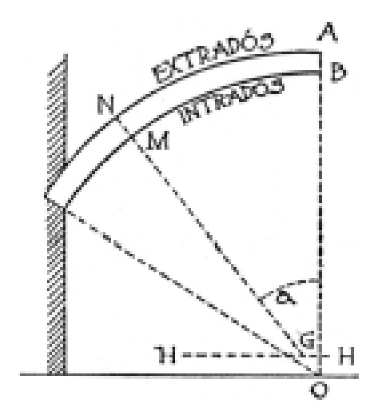



Figura 18
Método gráfico para determinar el espesor de arcos y bóvedas tabicadas

Se toma OH igual al espesor *e*, o AB. Se dibuja la línea horizontal H'H. La distancia OG es el espesor en la sección NM (Fig. 18). Como NM es la parte más débil del arco podemos tomar con suficiente seguridad el mismo espesor en el arranque, y así obtenemos el tercer punto necesario para trazar nuestra curva.

Con la misma expresión podemos obtener el espesor necesario del arco con una carga puntual en la clave, pero sustituyendo en las fórmulas 8*f* por 4*f*.

Ahora llegamos al problema de una carga aplicada sobre un punto cualquiera de un arco. Se ha dicho que este tipo de arcos no puede utilizarse para resistir una carga móvil o concentrada. Un arco es seguro cuando la línea de empujes actúa dentro del tercio central de su sección. Sabiendo ésto aplicamos la fórmula general para hallar el espesor en la clave, y trazamos gráficamente la línea de empujes, como si la carga estuviera actuando sobre el punto 11 (Fig. 19). Ésto da una línea de empujes más baja que en cualquier otro punto para una mitad del arco, y cuando la carga se encuentra en la posición correspondiente del lado opuesto, se obtiene por simetría la línea del arco completo.

Después hay que colocar la mitad del espesor obtenido en la fórmula a ambos lados de la línea de presiones O, O', O" (Fig. 19), formando las líneas X, X', X", Z, Z', Z", que representan el espesor total del arco. Con esto, como hemos dicho, obtenemos el espesor del arco correspondiente a la línea de presiones más baja que determina una posición cualquiera de la carga.

Cuando la carga actúa sobre el punto 11, el empuje pasa por las líneas imaginarias 11C y 11*e*; cuando la carga está sobre el punto 10, el empuje pasa por las líneas imaginarias 10*a*, 10*e*', etc. Por lo tanto, es dentro de este área, entre el ni-

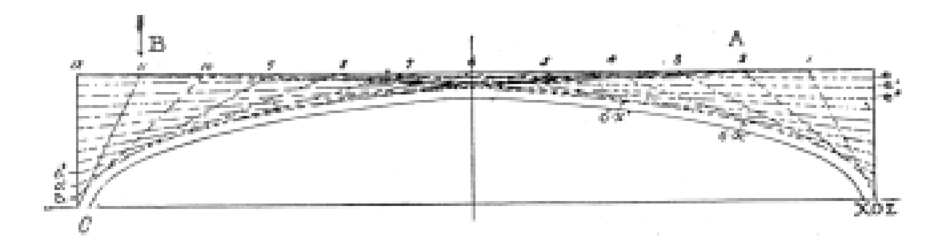



Figura 19
Método gráfico para determinar el espesor de arcos y bóvedas tabicadas bajo la acción de una carga puntual

vel del pavimento y la más baja de las líneas del arco (Fig. 19), donde se encuentra la línea de empujes. Esto significa que si colmatamos este espacio, o se llena como si fuese un relleno sólido, formando vigas tubulares, tenemos la seguridad de que la línea de empujes quedará inscrita siempre dentro del arco.

Decimos que se llena como si fuese un relleno sólido porque en la práctica es mejor evitar el enorme peso de una masa innecesaria de material y, al mismo tiempo, la condensación que ésta acumula en el techo. Se construyen sobre la parte más baja del arco un relleno sólido y sobre él unos tabiques transversales a suficiente distancia (generalmente con 60 cm de separación), y encima arcos planos del mismo espesor que el arco inferior. Este conjunto forma un arco tubular regular, ligero, seco y bien ventilado, con la suficiente resistencia en cada punto.[11]

EJEMPLO DE CÁLCULO: Consideremos un arco con una luz de 4,5 m, y un 10 % de flecha, que debe soportar 12 kN/m² incluyendo material y carga repartida.

$l$ = 4,5 m
$f$ = 0,45 m
$\sigma_c$ = 14,21 N/mm²
$P$ = 12 kN/m² × 4,500 m × 1 m = 54 kN = 54.000 N

Como la carga está repartida,

$$A \cdot \sigma_c = \frac{54.000 \text{ N} \times 4.500 \text{ mm}}{8 \cdot 450 \text{ mm}} = 67.500 \text{ N}$$

entonces,

$$A = \frac{67.500}{14,21} = 4.750 \text{ mm}^2$$

Pero estamos trabajando con el 10% de la carga de rotura, por lo que $A$ será 47.500 mm², esto es, un área de 1.000 mm × 48 mm ó casi dos rasillas de espesor (1 y ¾). Se usarán, pues, dos hojas de ladrillo.

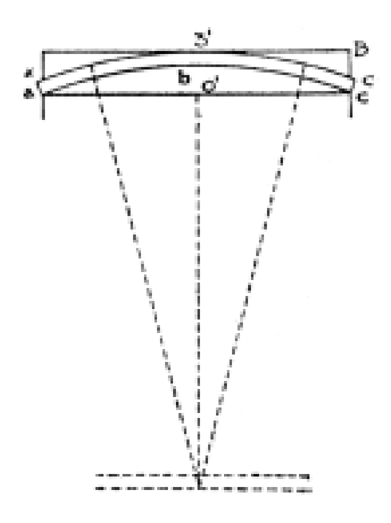


Figura 20
Ejemplo práctico de dimensionado de una bóveda tabicada

Sin embargo, hasta ahora sólo hemos obtenido el espesor mínimo en la clave del arco. Para calcular el espesor en el arranque, habremos de determinar el trasdós N'A'*c* (Fig. 20) por el método gráfico deducido de la fórmula de Dejardin,[12] o por la fórmula (4). Así obtenemos que el espesor en el arranque es aproximadamente $1.000 \times 55$ mm, en vez de los $1.000 \times 48$ mm, esto es, tres capas de rasillas. Por tanto, en los riñones se incrementará la sección hasta 75 mm (3 pulgadas) lo que servirá para mejorar la resistencia al momento flector.[13,14] Sería suficiente con 6,3 cm (2 ½ pulgadas), pero es mejor dar media pulgada de más para estar del lado de la seguridad, ya que no se fabrican ladrillos más delgados con los que conseguir ese espesor. Es preferible admitir el incremento de la sección en la base del arco, dejando tres hojas a los lados y dos en el centro.

## Cúpulas

La cúpula es la mejor forma de la construcción cohesiva para techos, forjados y tejados, así como de la construcción tabicada. Para obtener el espesor en la clave utilizamos la siguiente fórmula para cargas repartidas:[15]

$$e_c = \frac{1}{2}\left(\frac{Pl}{8f}\right)\cdot\frac{1}{\sigma_c} = \frac{1}{2}e \qquad (5)$$

donde $e$ es el espesor de un arco de ancho unidad de la misma luz y flecha, con la misma carga repartida (ecuación (3)). En los arranques se toma el espesor del arco correspondiente restándole el espesor en la clave de la cúpula:

$$\frac{e}{cos\ a} - \frac{e}{2} \qquad (6)$$

EJEMPLO DE APLICACIÓN: Consideremos una cúpula rebajada de 12,2 m de luz y flecha de 1/10, que soporta la misma carga de 12 kN/m$^2$ del ejemplo anterior. Los datos son:

$l$ = 12,2 m
$f$ = 1,22 m
$\sigma_c$ = 14,21 N/mm$^2$ de carga de rotura
$P$ = 12 kN/m$^2$ × 12,2 m × 1 m = 146.400 N

Como la carga es repartida,

$A\sigma_c$ = 146.400 N × 12,2 m / (8 × 1,22 m) = 183.000 N
y 183.000 N / 14,21 N/mm$^2$ = 12.880 mm$^2$,

como tomamos el 10% de la carga de rotura, y se ha considerado una banda de 1 m, el área de 128.800 mm$^2$, lleva a un espesor de 12,9 mm, ó 5 rasillas de ½ pulgada de espesor; en los arranques el espesor será de 7 pulgadas, todo esto para el arco análogo. Debemos descontar, ahora, la mitad de esas cantidades, 2 ½ pulgadas en la clave y en los arranques. Descontaremos dos pulgadas ó 5 cm, que equivalen a dos rasillas, con lo que da un espesor de 3 rasillas (75 mm) en la clave y 5 rasillas (125 mm) en los arranques.

*Explicación de la fórmula general*

No se pretende dar la fórmula matemática absoluta, sino una que sea práctica, suficiente para garantizar la seguridad en la construcción.[16]

Se puede añadir que estas fórmulas y teorías, si no se basan totalmente en las teorías conocidas y aceptadas para el sistema de gravedad, lo hacen, sin embargo, en los principios admitidos para los sólidos continuos. Pensé que, antes de explicar los diferentes comportamientos de éstos dentro de la teoría del sistema cohesivo del que se hablará después, sería mejor exponerlas de la forma habitual para hacerlas más claras, y evitar ideas erróneas que compliquen su comprensión.

Consideramos nuestro arco no como un arco de dovelas, sino como un arco simple de fundición que trabaja como una pieza maciza arqueada de piedra o hierro.

Supongamos que se fabrica una pieza maciza de material de la forma 1BC (Fig. 21) sin tener en cuenta su peso, siendo la curva 1C la mitad de un arco rebajado y apoyado en C. Aplicando 10 toneladas en el punto 1, se obtienen por las leyes de la mecánica que siendo BC = B1, necesitamos en el punto I una presión horizontal de 10 toneladas para mantener el equilibrio.

El siguiente paso consiste en pasar las 10 toneladas al punto 2, esto es, un arco cuya luz CC" (Fig. 21) es 4 veces la flecha. Como B2 es el doble de BC, las 10 toneladas verticales sobre el punto 2 deben equilibrarse con $10 \times 2 = 20$ toneladas aplicadas horizontalmente.

A continuación se trasladan ahora las 10 toneladas al punto 3; esto es, un arco cuya luz es 6 veces la flecha, y se obtendrán que para el equilibrio será necesario multiplicar $10 \times 3 = 30$ toneladas. Lo mismo ocurre cuando se pasa al nº 4, donde será igual a cuarenta toneladas, y al nº 5, igual a cincuenta toneladas; esto es, en un arco con una flecha del diez por ciento de la luz, se tiene un empuje en la clave cinco veces mayor que el peso de la carga puntual situada en su centro.

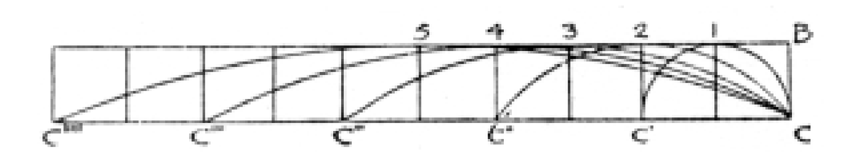



Figura 21
Arcos rebajados de distinta proporción luz/flecha

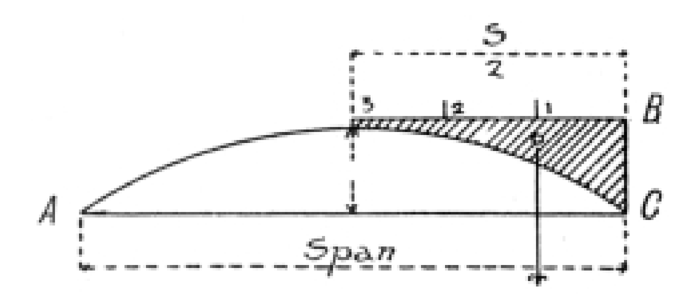



Figura 21bis
Cálculo del empuje horizontal de un arco rebajado

Acto seguido se desdobla la figura en el arco completo CA (Fig. 21 bis), y se considera la misma carga de 10 toneladas en el punto 3 de cada mitad y los apoyos en los puntos C y A, de manera que se forme un único arco. Así tendremos un empuje en la clave del arco como mucho igual a la mitad de la anterior, o 30 para cada lado; el empuje real entre las dos cabezas será en total de 30 toneladas y no más.

Con esto se deduce que para cualquier carga puntual sobre un arco, el empuje se divide equitativamente entre ambos lados. Sin embargo, en la sección central del arco tenemos una presión mitad de la carga total. Esto demuestra que la sección en cualquier arco, independientemente de su propio peso, y teniendo en cuenta sólo el peso de la carga, será la misma que la sección en cualquiera de los arranques. La sección en la clave será $A\sigma_c$ = (Carga/2) × (Luz/2) para una carga concentrada, o $A\sigma_c$ = [(Carga/2) × (Luz/2)]/$f$ × 2 para una carga repartida, reemplazando B1, B2, etc., en cualquier caso por Luz/2 y BC por $r$, la flecha del arco, que simplificando da $A\sigma_c$ = (Carga × Luz × 4)/2$f$ = (Carga × Luz)/(4 × 2 × $f$) = $Pl/8f$.

Estas expresiones generales, $Pl/8f$, representan en todos los casos de carga repartida la presión en la sección central de un arco en relación con la luz y la flecha. Este valor debe ser igual al área multiplicada por el valor de la resistencia del material con el que está construido el arco.

Representemos este área por $A$ y la resistencia del material por $\sigma_c$; entonces, $A\sigma_c$ es la resistencia total de la sección de ancho unidad.

De este modo $A\sigma_c/1 = Pl/8f$, entonces $e = A/1 = (Pl/8f)\,(1/\sigma_c)$.

La expresión para el espesor en los arranques proviene, como se ha dicho, de la conocida fórmula de Dejardin, según la cual si *e* es el espesor en la clave el espesor en un punto definido por un ángulo *a* con la vertical, será *e/cos a*.

*Explicación de las fórmulas para cúpulas*

Las fórmulas (5) y (6) nos permiten obtener el espesor en la clave y los arranques de una cúpula, a partir de los espesores calculados para el arco del mismo perfil. Se basan en considerar que la cúpula empuja la mitad, por unidad de longitud en la base, que la bóveda de cañón del mismo perfil.

Debemos repetir aquí que no pretendemos dar una fórmula matemática absoluta, sino una regla práctica que sea suficiente para garantizar la seguridad en la construcción. Tampoco estamos considerando aquí una cúpula de dovelas, sino una tabicada que funciona como una simple cúpula de fundición, trabajando como una pieza única.

Las cúpulas cohesivas no se pueden considerar como una variante de la bóveda semicircular sino como un elemento constructivo absolutamente diferente para cubrir los espacios.

1. La superficie de una cúpula es exactamente la mitad de la superficie de una bóveda semicircular o rebajada con el mismo radio y un desarrollo igual a la mitad de la circunferencia de la base de esta cúpula, con la peculiaridad de que la superficie va disminuyendo proporcionalmente hacia la clave.[17] Se toma la planta de una cúpula (Fig. 22) y se divide en pequeños sectores radiales 1, 2, 3, 4, etc., de modo que cada sector se pueda considerar infinitesimal.Se supone que después se construye con estos sectores un tramo de bóveda con el mismo perfil que la cúpula, de manera que (como en la Fig. 23) tenga por base la mitad de los sectores de la cúpula sobre la línea BA, y sobre la otra base CD la otra mitad de los sectores. Así tendremos una bóveda, aunque con aperturas X X' X" X'"...$X^{12}$ $X^{13}$. Se observa que la superficie 1 + 24 = $X^{10}$, 2 + 23 = $X^9$, 3 + 22 = $X^8$, etc., y que X + X' + X", etc. = (1 + 24) + (2 + 23) + (3 + 22), etc.; pero como la superficie X + X' + X" es la suma de todos los espacios abiertos y no se puede considerar ninguna carga sobre ellos, *P*, en la expresión *Pl/8f*, será:

$$\left(\frac{P/2 \cdot l}{8f}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{Pl}{8f}\right)$$

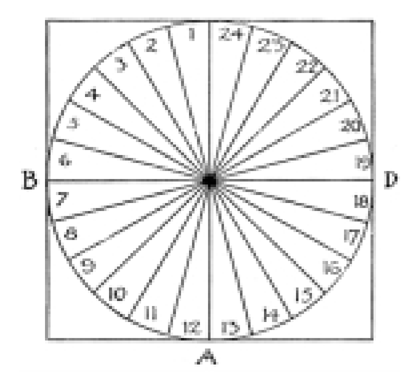



Figura 22
Planta de una cúpula

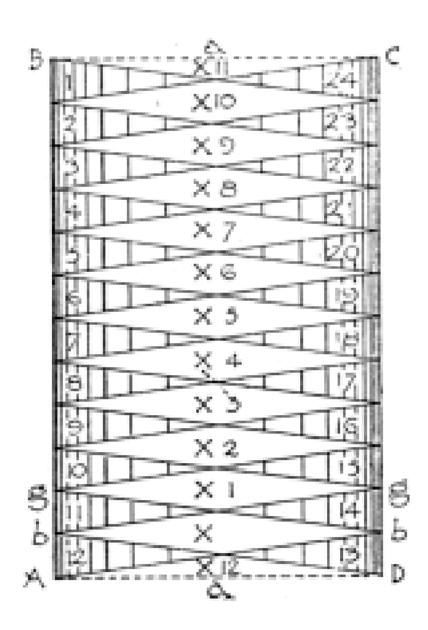



Figura 23
Bóveda de cañón compuesta a partir de los sectores de la cúpula de la figura 22

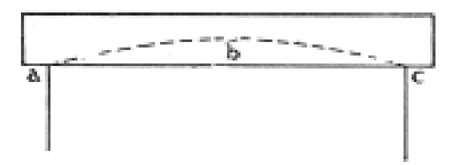



Figura 24
Dintel monolítico

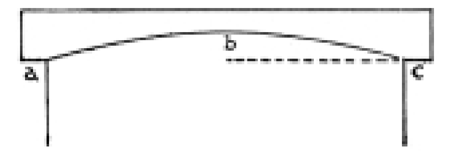



Figura 25
Dintel con el intradós rebajado

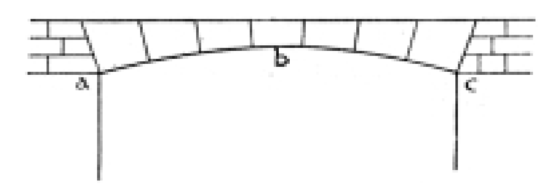



Figura 26
Arco adintelado de dovelas

2. El material de una cúpula no trabaja sólo a compresión, sino que a consecuencia de su forma también trabaja a tracción, ya que el empuje depende de la forma y no del material. Consideremos un dintel de piedra como el de la figura 24; si lo colocamos así no habrá prácticamente empuje. Si tomamos otro dintel como el primero, pero suprimimos el material por debajo de la línea curva *a*, *b*, *c* (Fig. 25), aparece inmediatamente un empuje. Podemos comprender sin demostración que en el segundo caso hay empuje y en el primero, comparativamente, ninguno. Esto no significa que en el primer caso no exista en absoluto, porque

dentro de cualquier dintel que trabaja debemos considerar un arco, del mismo modo que en cualquier bloque de piedra, mármol o madera sabemos que existe cualquier figura que la imaginación pueda concebir. La cuestión es retirar la cáscara que la rodea. Del mismo modo, en cualquier elemento de madera, o bloque de piedra, existe un arco mejor que el que pueda definir el más exacto matemático. En cuanto ponemos un dintel a trabajar, este arco imaginario empieza a actuar, y todo el material situado por debajo colabora para disminuir el empuje, ya que es el tirante de este arco imaginario. Ahora bien, si retiramos este material (que es la condición en el segundo caso), como el material que trabaja como tirante no existe, el arco puede pesar y empujar con más libertad.

Pero tenemos un tercer caso en la figura 26. Éste no es un dintel donde eliminamos la parte inferior de material y, como en los casos anteriores, obtenemos un arco. Es un arco normal formado por dovelas. No es necesario demostrar que éste produce empuje, aunque en este caso el empuje es total, si podemos llamarlo así. Quiero decir con «total» que en el segundo caso el dintel de piedra, tallado en curva, no es tan libre como el tercero, ya que, para observar algún indicio de empuje, es necesario romper el dintel. Por lo tanto, el efecto del empuje comienza cuando se vence la resistencia cohesiva de la piedra, mientras que en el tercer caso éste comienza de inmediato, ya que se compone de varias piezas y no hay cohesión. Nuestras bóvedas de cañón trabajan como en el segundo caso.

Considerando el caso de las cúpulas, supongamos una cúpula compuesta por dovelas (Fig. 27). Esta cúpula producirá empuje porque es una modificación del arco escarzano de dovelas (Fig. 26).

Tomemos ahora (Fig. 28) una gran losa circular de piedra de, por ejemplo, tres metros de diámetro y un espesor de 30 a 45 cm. Si apoyamos su contorno a modo de dintel, no se produce prácticamente empuje, y si tallamos una cavidad en la parte inferior (Fig. 29), cóncava como la de una cúpula, tendremos un arco cupuliforme, pero sin producir empuje. No se trata del segundo tipo de dintel, donde al eliminar el material que está trabajando como tirante, comienza a actuar el empuje. En el caso de la cúpula no ocurre así, ya que el material que trabaja como una barra a tracción es el de los anillos, que permanecen como tales. Éste es nuestro caso. Si construimos los forjados en forma de cúpula, y están bien utilizados y adecuadamente construidos, no tendremos prácticamente ningún tipo de empuje.[18]

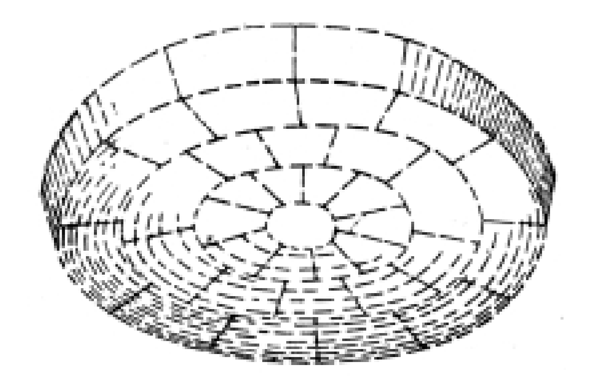


Figura 27
Cúpula rebajada de dovelas

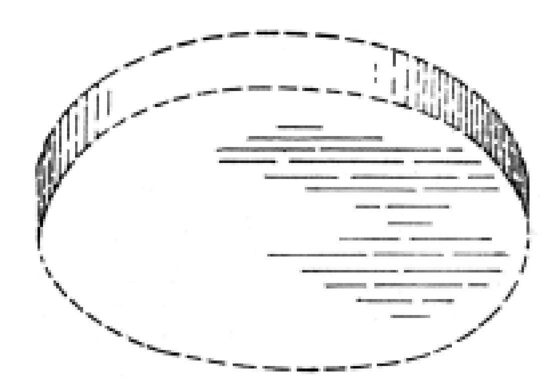


Figura 28
Pieza cilíndrica monolítica

## Teoría de la construcción cohesiva basada en la teoría de los elementos cohesivos

### *Análisis de algunas peculiaridades del sistema*

Antes de avanzar más, me gustaría realizar algunas observaciones preliminares, llamando la atención sobre algunos principios esenciales y peculiares del sistema cohesivo aplicados a los elementos soportados. No son nuevos desde el punto de

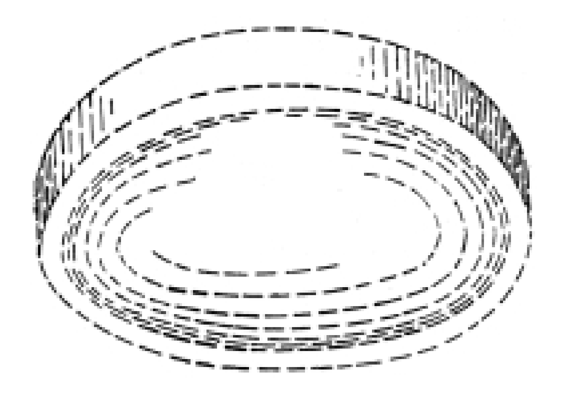


Figura 29
Pieza cilíndrica monolítica con el intradós rebajado

vista técnico, pero no se tienen en cuenta hoy día en la construcción habitual, y no pueden explicarse con la teoría del arco de dovelas.

En cualquier forjado compuesto por bovedillas cohesivas soportadas entre vigas, cuanto menor sea el radio de curvatura del arco, menos carga han de soportar las vigas y, por tanto, más ligeras pueden ser éstas.

Esto significa que un forjado fabricado por arcos cohesivos construidos como los de la figura 30 resistirá más peso que otro con las mismas vigas y luces, figura 31, cuyos arcos tienen más radio. Este principio, a primera vista, parece absur-




Figura 30
Forjado de vigas de hierro y bóvedas rebajadas




Figura 31
Forjado de vigas de hierro y bóvedas más rebajadas



Figura 32
Forjado de vigas de hierro y bóvedas rebajadas de radio casi infinito



Figura 33
Bóveda rebajada de radio infinito



Figura 34
Bóveda rebajada de radio de curvatura finito

do por la mayor cantidad de material utilizado, ya que el arco tiene mayor superficie y por tanto mayor peso a cargar sobre las vigas. Que esto es cierto se verá a continuación.

Supongamos que las figuras 32 y 33 tienen arcos de radio infinito, son arcos planos, y que la fibra neutra se encuentra en la sección transversal $XX'$. El material situado por debajo de la fibra neutra trabajará a tracción y el superior a compresión. En nuestro caso sólo hay tres capas, o lo que es lo mismo, 8 cm de espesor, por lo que el momento de tracción será el correspondiente a 4 cm y lo mismo el de compresión.

Ahora suponemos que la figura 34 es un arco de 30 cm de flecha . El eje neutro será $X^4$ $X^5$. La parte situada por debajo, que trabaja a tracción, tendrá un momento correspondiente a 15 cm, y lo mismo la situada por encima. Estas zonas

de tracción y compresión implican que el arco actúa realmente como una segunda viga, llevándose parte de la carga de la viga de hierro.[19] Para calcular la resistencia extra que este tipo de arco añade a la construcción de la cual forma parte, —que depende de la resistencia a tracción del material, igual a 1,54 N/mm$^2$—, podemos aplicar la siguiente fórmula:[20]

$$P = \frac{8f\sigma_t A}{l} \cdot [\alpha]$$

donde:

$P$ = carga total
$l$ = luz
$f$ = flecha
$\sigma_t$ = resistencia de rotura a tracción
$A$ = área de la sección transversal del arco en en mm$^2$

Ésta será la carga de rotura. La viga debe ser lo bastante resistente como para superar la resistencia aportada por el arco, de modo que éste no pueda alcanzar nunca su carga de rotura.

En cualquier forjado compuesto por bóvedas de cañón construidas a partir del principio de la construcción cohesiva, apoyadas en vigas, los extremos de las vigas y los bordes extremos de la bóveda de cañón reciben la carga principal y por tanto, las vigas reciben un peso mínimo en su parte central.

Supongamos que las figuras 35, 36 y 37 son bóvedas de cañón construidas sobre dos vigas, que a su vez se apoyan en dos muros laterales. Consideremos dos arcos diagonales, *a*, *b*, *c*, *d*. Cualquier carga uniformemente distribuida sobre estos arcos afectará del mismo modo a todos los puntos situados en los vértices de la bóveda, por encima del borde de las vigas; pero como los puntos *a*, *b*, *c*, *d* son los más rígidos, serán ellos los que primero reciban el peso de los arcos, ayudando así a las vigas,[21] y estableciendo las líneas de tensión *ab* y *cd*. (Figs. 35 y 36). Arcos semejantes se formarán desde el punto *a* al diagonalmente opuesto *b*, y desde *d* al opuesto en diagonal *c*, tendencia que resulta similar a los principios mencionados anteriormente.

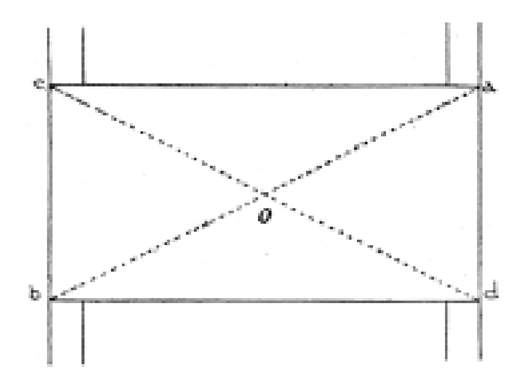



Figura 35
Bóveda de cañón apoyada sobre vigas longitudinales y muros transversales en planta

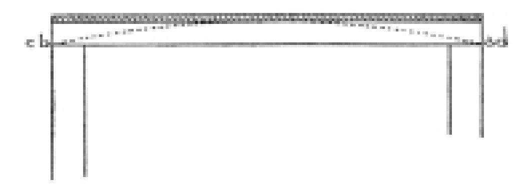



Figura 36
Bóveda de cañón apoyada sobre vigas longitudinales y muros transversales en sección

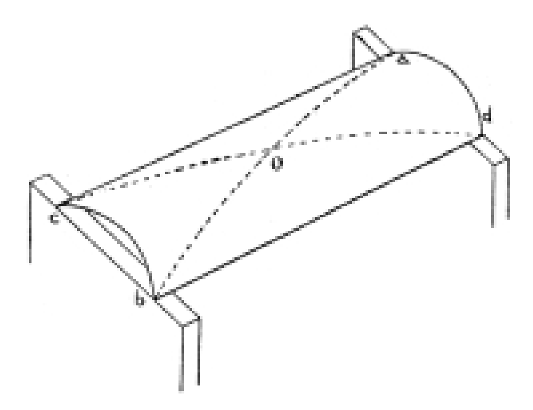



Figura 37
Bóveda de cañón apoyada sobre vigas longitudinales y muros transversales en perspectiva

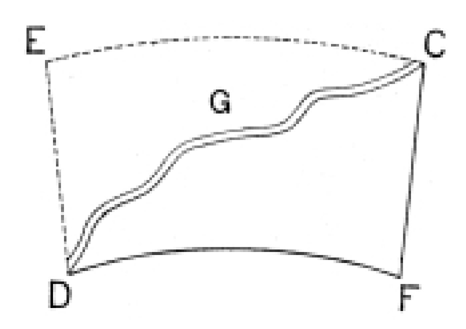



Figura 38
Bóveda de cañón con una rotura diagonal

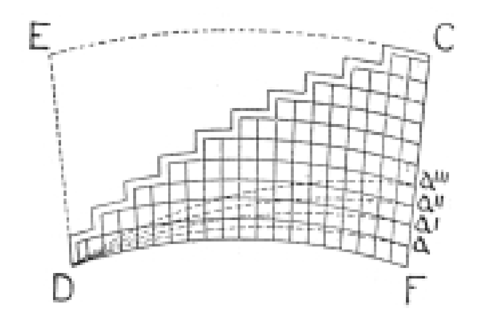



Figura 39
Arcos que se forman en una bóveda de cañón con una rotura diagonal

La figura 38 representa una bóveda de cañón rota diagonalmente en dos de forma irregular. En la práctica, una bóveda tabicada mantiene su equilibrio en este estado, hecho que no puede ser explicado por la teoría del arco de dovelas. Las dovelas que comienzan en la línea FC (Fig. 39) ofrecen un doble apoyo al primer anillo FD, pero el segundo anillo *a*' tiene sólo uno. Lo mismo ocurre en el caso de *a*'', *a*''', etc., y de acuerdo con el sistema de gravedad el arco no es admisible —no es seguro. Pero en nuestro sistema sabemos que este arco se mantendrá en pie, como vemos que ocurre cada día. Todo lo que hacemos es reforzar el

punto D, arqueando de forma radical desde el punto D a la línea opuesta FC, o riñón que forman los elementos cohesivos conoidales, FD*a*, *a*D*a*', *a*'D*a*"... (Fig. 39), que se yuxtaponen. Así, los elementos b, b', b", etc. (Fig. 40), que descansan sobre el borde CF, convergerán en el punto D.

Si añadimos a esta bóveda de cañón rota (Fig. 38; planta en la Fig. 40) el fragmento EGC (Figs. 38 y 40), haremos converger la mitad de los elementos b, $b^{I}$, $b^{II}$, $b^{III}$, $b^{IV}$, $b^{V}$, $b^{VI}$, $b^{VII}$ en el punto D y la otra mitad en el E, con lo que obtenemos un arco perfectamente seguro, tal como hacemos en los arcos exentos. La suma de los elementos cohesivos a lo largo de la línea o borde FC debe ser igual a la suma de los elementos que convergen en el punto D y E.

Se puede destacar que si no se soportase ninguna carga el espacio vacío EGD (Fig. 40), parece que podríamos suprimir los elementos b, $b^{I}$, $b^{II}$, $b^{III}$, $b^{IV}$, $b^{V}$, $b^{VI}$,

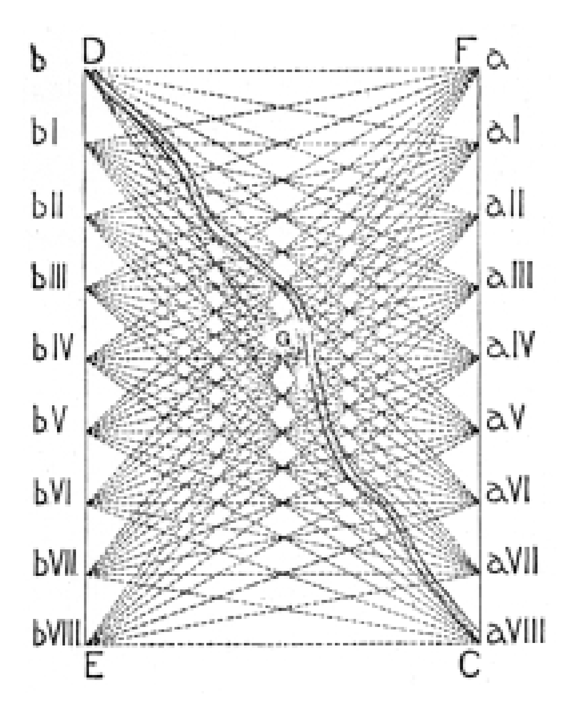



Figura 40
Comportamiento estructural de una bóveda de cañón apoyada en los extremos

$b^{VII}$. Pero hay que advertir que parte de los elementos que irradian desde FC quedan interrumpidos por la apertura DGE, y deben sufrir una desviación que busca la misma desviación de los elementos, b, $b^{I}$, $b^{II}$, etc., si convergen en los puntos D y E.

Ninguno de estos ejemplos puede ser explicado por la teoría del arco de dovelas ni del sistema de gravedad, y suponemos que son suficientes para ilustrar la incompatibilidad de estas teorías con los resultados de la experiencia actual. Creo que es más racional y sencillo explicar estas cualidades partiendo de la resistencia cohesiva de los materiales empleados, y en consecuencia ¿por qué no explicar la teoría de las bóvedas cohesivas a través de la teoría de los elementos cohesivos?

Si construimos la figura 41 con piedras colocadas unas sobre las otras, anclando la base, sólo la fuerza de la gravedad las mantiene en su lugar, y cualquier carga horizontal, *P*, debe ser resistida por el peso de cada elemento, sin que exista otra fuerza que pueda ayudar a la construcción en su conjunto.

Para explicar esto hagamos:

*P* = la carga horizontal
*d* = la distancia del punto de aplicación de *P* respecto a la junta *aa*'
*W* = peso total sobre *aa*'
*b* = la anchura *aa*';
Tomando entonces momentos respecto a *a*' obtenemos la ecuación:

$$P \cdot d = W \cdot \frac{b}{2}$$

Pero si construimos la figura con material cohesivo (Fig. 42), la fuerza horizontal *P* deberá vencer no sólo a la gravedad, sino también a la resistencia cohesiva del material que resiste a tracción en *a* y a compresión en *a*'. Si la tensión producida en cada uno de estos puntos es igual a $\sigma$, entonces $P \cdot d = W \cdot b/2 + (\sigma \cdot b) \cdot [b/2]$.[22] Esto por lo que se refiere a la construcción vertical sobre una base sólida.

Para una construcción horizontal en el espacio, si suponemos una estructura como la de la figura 43, construida con sillares, se comprende fácilmente que

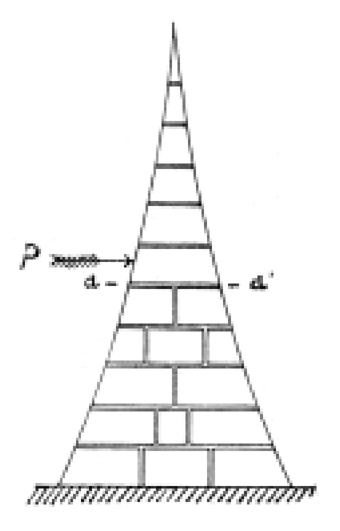



Figura 41
Elemento vertical construido según el sistema de gravedad

Figura 42
Elemento vertical construido según el sistema cohesivo

su construcción sería imposible, ya que las juntas no tienen resistencia cohesiva y su peso la haría desplomarse en seguida. Pero con material cohesivo podemos construir una estructura como la de la figura 44, de manera que la resistencia cohesiva de cada partícula de la estructura resistirá la fuerza de gravedad que actúa sobre esa partícula. Para analizar esta construcción llamaremos al vuelo $l$ (= B*a*') y después, como el centro de gravedad se encuentra aproximadamente a un tercio de la luz en horizontal respecto al centro de gravedad de la sección *aa*', tomaremos $W$ como el peso de la estructura, que en este caso tiende a producir la rotura en *a*. Tomando momentos como antes, deducimos la expresión

$$W\left(\frac{l}{3}\right) = (\sigma b)\left[\frac{b}{2}\right]$$

En este caso vemos que la expresión $W \times b/2$ desaparece, pero tenemos la fuerza que resiste la rotura, esto es, la resistencia cohesiva del material.

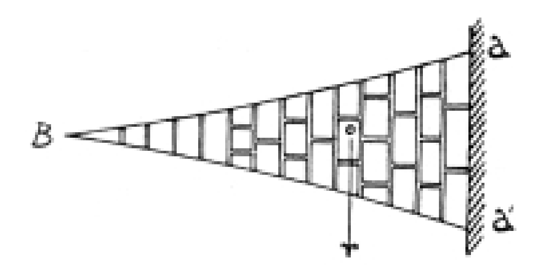



Figura 43
Elemento en voladizo construido según el sistema de gravedad

La figura 41 representa el sistema de gravedad. Se construye con sillares que tienen resistencia cohesiva en sí mismos, pero no entre ellos, de forma que sólo actúa la gravedad. En el segundo caso (Fig. 42), empleamos un material que tiene vida en sí mismo, transformándolo en una estructura homogénea que tiene las mismas propiedades en todos los puntos, como un monolito que imita el comportamiento de la piedra en la cantera. El tercer caso (Fig. 43) no puede ser tenido en cuenta porque una forma así no puede ser construida en el sistema de gravedad; y en el cuarto (Fig. 44) sólo contamos con la fuerza de cohesión.

Comparando estas cuatro figuras advertimos la ventaja de trabajar con un material vivo, es decir, con material que intrínsecamente posee la propiedad de la re-

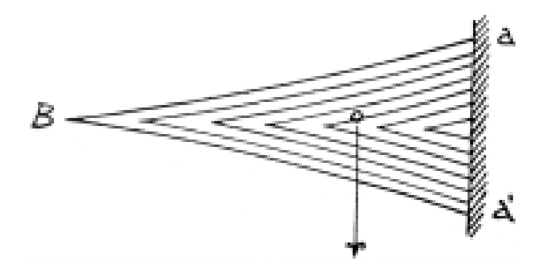



Figura 44
Elemento en voladizo construido según el sistema cohesivo

sistencia cohesiva. Podemos observar que la resistencia mínima será la que corresponde al material que sólo trabaja a flexión, o al caso en que no toda la sección está recibiendo presión, o incluso para una posición horizontal (Fig. 44), siendo *d* cero. La máxima será la del material que trabaja principalmente a compresión o cuando *d* sea infinito, es decir, cuando los laterales de un arco son prácticamente dos muros.

Pero en cuanto *d* (en la Fig. 44) comienza a tener un valor finito aparecerán tanto tracciones como compresiones colaborando a mantener la estabilidad, y cuanto mayor sea el valor de *d* mayor será la compresión y menor la tracción. Por lo tanto debemos fijar dos coeficientes, uno que podemos llamar $\sigma_c$ para la compresión y otro $\sigma_t$ para la sección transversal o módulo de rotura. La fórmula para el primero es:[23]

$$\left[\frac{b}{2}\right] \cdot b \cdot \sigma_c = Wl/2 \text{ y para el segundo, } \left[\frac{b}{2}\right] \cdot b \cdot \sigma_t = W' \cdot l/6$$

La expresión *l*/6 se deduce de lo siguiente (Fig. 42): *l* es igual a la luz y *l*/2 a la mitad de la luz, pero como estamos considerando solamente el peso del material, sabemos que su punto de aplicación se encuentra a 1/3 de *l*/2, es decir, *l*/6.[16]

# 4

# Aplicaciones modernas. Importancia estética de la construcción cohesiva

Una confusión general es creer que el arte de la construcción en fábrica todavía está en su infancia, que sigue en un estado rudimentario. Tal vez estas ideas provienen del hecho de que la técnica actual de esta clase de construcción, que normalmente se enseña en nuestras escuelas, está poco avanzada respecto a la empleada para construir los edificios del año 1000 ó 2000 a.C., es decir, los utilizados por los egipcios.

Es verdad que, en la Edad Media, cuando el arte arquitectónico estaba tomando conciencia de su independencia, con la reproducción hasta el infinito de sus motivos, encontramos obras que aún admiramos como modelos constructivos y artísticos, entre las que se incluyen aquéllas, no cohesivas, que dependen de la gravedad. No obstante, ninguna de las ciencias constructivas admite todavía que se trata de simple construcción general. Pocos arquitectos están dispuestos a arriesgar sus firmas en ellos, y aquéllos que lo hacen sólo admiten las líneas exteriores. ¿Por qué? Supongamos que un arquitecto piensa construir una estructura con una combinación de cúpulas como en Santa Sofía de Constantinopla o en la catedral de Zamora, y envía los planos al Departamento de Edificación para su aprobación. Obtener la licencia de construcción de una estructura de este tipo será para él la tarea más difícil y por lo tanto tendrá que imitar las líneas artísticas exteriores e interiores mediante una falsa construc-

ción. ¿Qué significa esto? ¿Estamos progresando, o es nuestro conocimiento inferior al de la Edad Media?

Tal vez esto pueda explicarse de la siguiente manera: los constructores medievales hacían arquitectura al construir, elaboraban proyectos que llevarían a cabo ellos mismos. Eran, sencillamente, constructores y arquitectos, y no podía ser de otro modo, ya que sólo el mismo genio que las concibió podía levantar aquellas grandes e innumerables concepciones arquitectónicas de la Edad Media. Por eso hoy no sabemos qué admirar más en esos monumentos: las líneas arquitectónicas o la afortunada resolución de los problemas constructivos.

Lo cierto es que no estaban limitados por ninguna norma edificatoria, siendo a la vez constructores y arquitectos, o viceversa. Su plena libertad al construir suponía una gran ventaja para el arte arquitectónico en dos sentidos: era beneficiosa para el progreso de la construcción, y también en el aspecto artístico, ya que el trabajo de un arquitecto no debería consistir sólo en los planos, sino también en la construcción; los planos son el proyecto y la obra es el edificio. ¿Es extraño entonces que la Historia del Arte considere a la Edad Media como una de las épocas arquitectónicas de mayor originalidad? Sus viviendas, palacios, ayuntamientos, cámaras de comercio, iglesias, conventos, fortalezas y catedrales, son insuperables, tanto en belleza como en habilidad técnica. No podemos decir lo mismo de los tiempos modernos, a excepción de nuestros grandes puentes de hierro, estaciones, etc.

El arquitecto actual por razones que no se pueden analizar aquí, realiza planos que normalmente ha de construir otra persona, además de que las exigencias constructivas le vienen fijadas por las normas edificatorias como datos oficiales. No necesita reflexionar mucho sobre los problemas de la construcción y, por tanto, pierde conciencia día a día del hecho de que es un arquitecto completo tal como antes se entendía esta palabra genérica.

Por otro lado, el constructor —quien ejecuta los planos del arquitecto, y dado su carácter de simple constructor— no sólo tiene *prohibido* comprender cuestiones que pertenecen al arquitecto, sino que no puede modificar en nada el problema constructivo. Esto se debe no sólo a una cuestión de carácter económico, sino también al hecho de que el constructor no suele ser hombre de estudios, y únicamente posee ciertas nociones sobre materiales, oficios generales y andamiajes y, con suerte, el conocimiento necesario para hacer presupuestos.

Esta anómala combinación ofrece un extraño resultado. En primer lugar, se tiene la sensación de que el trabajo de un arquitecto consiste en dibujar planos y llevar la dirección de la parte artística, y también de que el problema de la construcción debe adecuarse al nivel general de conocimientos de los contratistas. El arquitecto, para eludir dificultades, establece las especificaciones y condiciones generales de la construcción de acuerdo con las normas oficiales y con la habilidad intelectual de los constructores. Ahora bien, siendo éste el modus operandi general en prácticamente todo tipo de edificios, es evidente que, aunque el así llamado aspecto artístico pueda estar en algunos casos muy estudiado, si el arquitecto proyectista no construye los edificios, el progreso constructivo, el progreso arquitectónico real queda frenado por dos impedimentos: las normas de la construcción y el comportamiento financiero del contratista. En consecuencia y con cierta razón, se puede llegar a pensar que para hacer planos de edificios no es necesario aprender construcción.

Esto me recuerda la siguiente anécdota. Cierto día Rossini preguntó a su profesor si era necesario saber contrapunto para aprender a componer ópera, y el profesor, pensando únicamente en la ópera italiana moderna, respondió que no.

Cabe de esperar que se produzca un cambio radical en la situación actual que redima al arte de estas condiciones innobles y serviles.

## Aplicaciones

Al hablar del sistema cohesivo aplicado a las bóvedas tabicadas, de las que trata en concreto este libro, soy consciente de que, incluso a los iniciados en la ciencia de la construcción, podría parecerles que este sistema sólo es aplicable a las bóvedas, tal y como se ha hecho en la construcción de los suelos sobre las bóvedas de la nueva biblioteca de Boston. Este sistema no está limitado al caso particular de la bóveda, ni se utiliza en competición exclusiva con los arcos de rosca de ladrillo, sino que consiste en un sistema completo de construcción que incluye muros, forjados, cubiertas, techos, tabiques, escaleras columnas, etc., mostrando en todos los casos grandes y sorprendentes ventajas.

## Forjados y cubiertas. Cómo trabajan sus materiales

Es evidente que la base de la economía constructiva está en la utilización de materiales ligeros de resistencia uniforme, adecuando su empleo de la forma que requiere su naturaleza. Si ponemos madera o hierro a trabajar por flexión, o los sometemos a compresión transversal, necesitaremos seguramente más material que sometiendo esa misma madera o hierro a tracción. Si los disponemos así obtendremos un ahorro. Esto mismo ocurre con la cerámica y el mortero cuando trabajan a compresión. Adquieren entonces su mayor eficacia, y pueden reemplazar al hierro y la madera con menor coste. En un forjado común encontramos vigas de madera o de hierro y entre ellas entablados de madera o bovedillas de ladrillo. ¿Qué función tienen las tablas de madera y las bovedillas de ladrillo? Sólo cubren el espacio entre las cerchas o las vigas. Los pesos totales los soportan únicamente las vigas o las cerchas, y esos «puentes» sólo contribuyen a aumentar el peso. Sin embargo, en el sistema cohesivo, si se dispone bien, el material sólo trabaja directa y estrictamente lo necesario. La cerámica trabaja para sostenerse a sí misma, por compresión, y el hierro lo hace como un tirante. En esto consiste el gran ahorro. Hay que admitir que con esas condiciones no es raro que este sistema pueda competir ventajosamente con cualquier otro, aunque el material en sí sea más caro.

Por muchas razones el techo o cubierta es la parte más difícil de proyectar en cualquier edificio, y el arquitecto centra su atención en ella, sabiendo que cualquier exceso o defecto de material afecta no sólo a su estabilidad, resistencia y coste sino también a la de los muros, pilares y cimientos, es decir, a la de todas las partes sustentantes.

La estructura de un techo se basa en los principios del puente, esto es, en los de cualquier elemento arquitectónico apoyado. La naturaleza nos da dado dos tipos fundamentales de elementos apoyados: la forma colgante y la forma de arco o bóveda. Además, la naturaleza nos ofrece accidentalmente una tercera forma, el dintel.

Si analizamos estas tres diferentes formas genéricas de cubrir vanos, descubriremos que la primera tiende a tirar de las partes sustentantes y la segunda a empujarlas hacia fuera. La resistencia a ambos esfuerzos es igual. En la primera

el material trabaja a tracción, y en la segunda a compresión. Para la primera la naturaleza siempre ha utilizado material fibroso. Por ejemplo, en la parra, cuyas ramas forman como un puente suspendido sobre un río. Para la segunda, la naturaleza ha empleado partículas ligadas entre sí por cohesión.

Estos dos tipos opuestos están unidos en un tercero, que también nos ha dado la naturaleza: el dintel, en el que ambos se relacionan. El material cohesivo que trabaja a compresión y el material fibroso que trabaja a tracción forman una sola masa, y el resultado es que la parte que trabaja a compresión, generalmente en la zona superior, presiona (en virtud de su íntima cohesión) a la parte que trabaja a tracción —normalmente en la parte inferior. La conclusión es que la práctica totalidad del área de la sección del dintel tiende a trabajar básicamente a flexión. Ahora bien, si a este inconveniente añadimos que ningún material tiene la misma resistencia a compresión que a tracción, la dificultad de garantizar un dintel o viga económicos es seria, a no ser que los dos materiales estén separados y trabajen libre e independientemente. Así se aprovecha plenamente la resistencia de ambos materiales. Ésa es la razón por la que ningún dintel o viga puede trabajar aisladamente de forma rentable. Pero esta estructura no es un dintel, tampoco una viga. Es la combinación de las dos que se indicaban antes, es decir, la forma suspendida que tiende a aproximar los elementos sustentantes o los muros, trabajando a tracción, y la forma del arco que tiende a empujar hacia fuera los elementos sustentantes o los muros, trabajando a compresión. Estas dos formas primarias, cuando se conectan adecuadamente, dan lugar a los elementos más económicos y fáciles de voltear. Pero para que estas formas compuestas de puente trabajen adecuadamente, deben tener una sección muy delgada, de modo que todas las fibras del tirante puedan trabajar básicamente a tracción. Un ejemplo de esta aplicación es un forjado construido con una bóveda de cañón continua (A), pequeños tirantes curvos (B), (Figs. 45 y 46), y un pequeño tabique apoyado sobre el tirante B, que levanta la bóveda de cañón. Esta disposición dará lugar a una viga en la que la bóveda de cañón y parte de los tabiques trabajarán a compresión, mientras que los tirantes trabajarán a tracción. Colocado así, el material trabaja según su verdadera naturaleza.

El tirante puede calcularse exacta e independientemente de la sección del arco, y viceversa, con la ventaja añadida de que cada material trabaja al máximo. La ce-

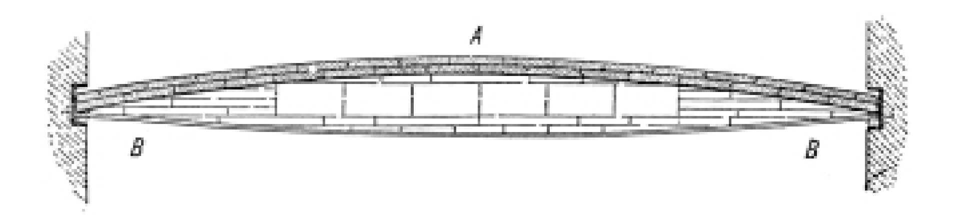



Figura 45
Bóveda de cañón continua con tirantes curvos y tabiques transversales. Sección transversal

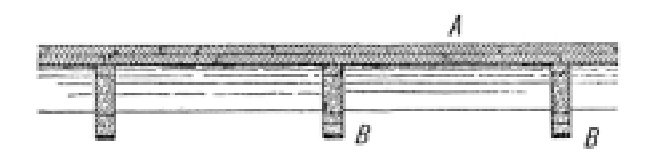



Figura 46
Bóveda de cañón continua con tirantes curvos y tabiques transversales. Sección longitudinal

rámica, o el arco, constituye y soporta al mismo tiempo el forjado o cubierta, lo que supone un ahorro evidente. Éste no es el caso de las vigas colocadas en paralelo, con entablado de madera o bovedillas de ladrillo intermedios, donde las vigas son el soporte real y el entablado y las bovedillas de ladrillo sólo sirven de relleno, añadiendo peso. Por el contrario, en el sistema explicado anteriormente, la viga virtual o dintel forma un elemento continuo.

Por esta razón, si se aplica adecuadamente el sistema cohesivo de construcción, la cerámica trabaja a compresión, soportándose a sí misma, y el hierro sólo como tirante. Pero si el sistema se utiliza de forma inadecuada o errónea, no resulta ventajoso. Esto ocurre cuando se combinan cerchas o vigas y bóvedas de cañón, como ya hemos dicho. El arco está pensado para voltear entre las cerchas, y éstas no sólo trabajan a flexión o sometidas a peso propio, que es la condición más desfavorable, sino que la bóveda de cañón y las cargas que soporta se añaden al peso de las cerchas. Por lo tanto, la cerámica no contribuye

lo más mínimo a soportar una parte cualquiera del forjado, ya que depende de la cercha y ésta, consecuentemente, resulta pesada y cara. Por eso la disposición mostrada en la figura 45 será siempre una construcción mejor, más económica y racional.

Cuando el tirante es de forma circular y continuo, y la bóveda de cañón se sustituye por una cúpula (Figs. 47 y 48), se obtienen considerables ventajas que enumeramos a continuación:

1. La cerámica no sólo trabaja a compresión, como dijimos en la parte teórica, sino también a tracción si se adopta la forma de una cúpula.
2. Es suficiente un tirante con forma de anillo (Figs. 47 y 48, anillo BB'B") colocado en el arranque de la cúpula. Dado que el material trabaja a tracción se equilibra en parte el peso de la cúpula. Este anillo o tirante circular puede tener una sección menor que el necesario para una bóveda de cañón de la misma superficie.
3. El hecho de que el tirante tenga forma de anillo en la base de la cúpula, supone la gran ventaja de que el hierro está mejor localizado para prevenir su destrucción en caso de incendio.
4. La forma de cúpula, que no requiere ningún tirante que cruce entre los arranques como en el caso de los arcos, la libera de cualquier obstáculo. Presenta un acabado mejor y una superficie noble para la decoración, de forma que ella misma es el primer elemento decorativo, si no por el material, sí por su forma.
5. Esta forma continua de la cúpula, sin la interferencia de los tirantes, ofrece también con sus suaves superficies curvas las mejores formas interiores para cualquier techo desde el punto de vista de la higiene y la ventilación.

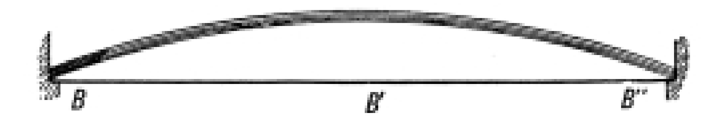



Figura 47
Cúpula rebajada con zuncho perimetral. Sección

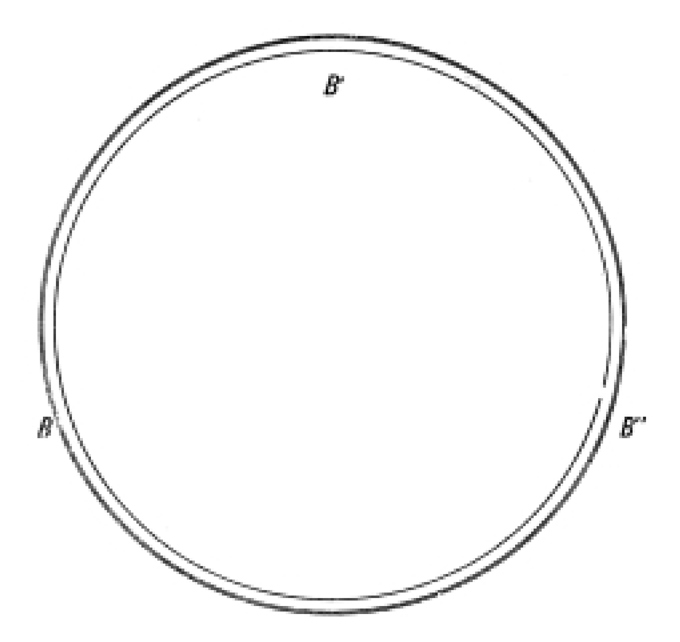



Figura 48
Cúpula rebajada con zuncho perimetral. Planta

## Bóvedas tabicadas huecas en forjados y cubiertas

En las cubiertas, y también en los techos que precisan decoración, la bóveda tabicada simple tiene un inconveniente. La cubierta transmite el calor, es decir, está fría en invierno y muy caliente en verano. En los techos decorados, si se usa hormigón para los rellenos, la condensación del ambiente interior produce humedades, que alteran los colores y destruyen la decoración. Para evitar ésto es necesario construir forjados y cubiertas huecos, esto es, compuestos por dos series de bóvedas tabicadas, una en la parte inferior como techo, y otra en la superior como suelo o cubierta, unidas por medio de costillas entre ambas bóvedas tabicadas. Las posibilidades de obtener estas formas, que podemos denominar «techos o cubiertas tabicadas tubulares», son infinitas. A continuación se mencionan algunos ejemplos construidos en América: el techo cupuliforme de la biblioteca del Club Arion, entre la calle 59 y Park Avenue; el forjado de la ampliación del edifi-

cio de la Young Women's Christian Association, sobre la sala de calderas, en la calle 16, cerca de la Quinta Avenida, Nueva York; la escalera principal de la Biblioteca Pública de Boston; el gran forjado de la entrada de coches para el mismo edificio, entre otros.

Esta bóveda hueca, o doble bóveda con separadores no tiene como única ventaja, sobre las simples reforzadas con nervios, la de aislar de la humedad y el calor, sino que también incrementa la resistencia de la bóveda, ya que la resistencia de una cercha tubular aumenta con el momento de inercia o radio de giro.

Por esa razón, en cualquier bóveda que requiera más de cuatro capas de ladrillo y para la que no exista limitación de espacio, es mejor construir siempre de una forma tubular, esto es, con dos capas en la parte inferior, nervios encima a modo de separador de 2,5 a 10 cm, según el espacio disponible, y dos capas en la parte superior. Como hemos dicho, esta construcción tubular tiene la ventaja de que la sección se puede incrementar a voluntad en los riñones, o en cualquier lugar donde los arcos o bóvedas requieran espesor, aumentando así el radio de giro a un coste muy bajo. De este modo se pueden hacer forjados huecos construyendo dos series de bóvedas entre las vigas. Un ejemplo de esto es forjado del suelo del Carnegie Music Hall. El espacio entre las dos series de bóvedas, con dos capas de ladrillo en la parte inferior y tres en la superior, apoyadas entre las cerchas, tenía la función de ventilar.

## Muros cohesivos huecos

Aunque los muros cohesivos difícilmente encajan en el asunto del que estamos tratando, están tan relacionados con la construcción de arcos y bóvedas, por ser su soporte y formar parte de sus riñones, que deben mencionarse, en especial los muros huecos. El enorme espesor que se da a los muros de los actuales edificios de diez, doce y más plantas, no parece apropiado dado el actual progreso en las propiedades del material. No obstante, se justifica si tenemos en cuenta que en estos muros se emplean normalmente materiales que requieren varios meses para asentar, no sólo por el lento fraguado natural del mortero empleado, sino también porque es necesaria la existencia de aire para su transformación en un elemento de apoyo.

Con esta clase de mortero no se pueden garantizar todos los muros de gran altura construidos con rapidez, ya que el mortero recibe más peso del que es capaz de soportar sin perder las condiciones de fraguado. ¿Por qué no construimos estos muros tan altos con cemento Portland? Cuando este material fragua adquiere una resisencia similar a la del ladrillo. Otra propiedad es que no requiere exponerse al aire para el fraguado. Con estas premisas, los muros podrían construirse con rapidez sin comprometer las condiciones de fraguado del mortero.

Es verdad que en este caso el muro no necesita un espesor tan grande, y que su radio de giro se puede reducir. Esto sugiere la idea de construirlo hueco, es decir, dar al muro la sección resistente requerida construyéndolo con una separación central, lo que incrementa el radio de giro. Esto significa hacer dos muros conectados entre sí para obtener el mismo momento de inercia que en el grueso muro mencionado arriba, pero con menos material. De esta forma aseguramos la valiosa condición de aislar el muro interior del exterior, que es uno de los problemas más importantes de la moderna ciencia de la construcción.

Hemos llegado a la conclusión de que los muros huecos son necesarios en los edificios modernos. Sin embargo, debemos realizar algunas observaciones en relación con estos muros. En primer lugar, deberían calcularse las dimensiones globales de los muros como se calculan para cualquier cuerpo hueco, no sólo para justificar las condiciones mecánicas del muro, sino también para darle el efecto artístico apropiado. El muro hueco trabaja exactamente igual que una columna hueca. Si tomamos la superficie de cualquier columna de hierro forjado, de sección circular o cuadrada, y consideramos maciza toda el área de la sección, la columna no sólo tendrá menos resistencia que cuando está hueca, sino que también se aprecia de inmediato que su aspecto es insuficiente, pobre y sin carácter. Lo mismo ocurre para un muro. Si construimos un muro alto sin darle las dimensiones mecánicas correctas, hueco o no, su aspecto también será pobre y sin carácter. En consecuencia, estos muros huecos se regirían por los mismos principios que se aplican para calucular el radio de giro de cualquier muro, dando al espacio hueco la anchura relativa necesaria entre los muros exterior e interior, de acuerdo con la resistencia a compresión del material utilizado. De esa forma, primero, aseguramos la cantidad exacta y necesaria de material de soporte de acuerdo con el progreso en la fabricación de materiales constructivos; segundo, conseguimos

el mismo resultado de incrementar el radio de giro sin aumentar el coste del muro y el peso sobre la cimentación; y tercero, se obtiene un espacio hueco siempre conveniente como aislante para otras aplicaciones.

La segunda observación es que hay una ventaja higiénica en los muros huecos. Se garantiza la absoluta ausencia de humedad y condensación. Así se hace al edificio más fresco en verano y más templado en invierno. Si los forjados también están huecos, los muros permiten la ventilación del edificio en las esquinas de las habitaciones, donde se concentra el aire impuro. Ésto supone una mayor sección para la ventilación de la que se puede obtener en cualquier otro sistema sin afectar a la solidez del edificio. Una fuente de grandes molestias para los arquitectos cuando un edificio necesita un gran número de chimeneas es la dificultad para situar las vigas, que forman brochal tras brochal, coincidiendo algunas veces la cabeza de una simple viga sobre el vano de una puerta. El arquitecto se devana así continuamente los sesos para realizar planos de estructura adecuados. En cambio, si todos los muros y forjados son tubulares, cualquier zona de la habitación puede ventilarse correctamente en cualquier dirección.[25]

## Fábricas

Existe una provincia que, como Nueva Inglaterra, vive de la actividad industrial basada en el algodón, la lana, la seda, los encajes, etc. Una provincia que, no sólo porque abastece su propio mercado, sino por su comercio exterior, sobre todo con Sudamérica, el este de la India y Norteamérica, recibe el nombre de «Manchester español». Me refiero a Barcelona, donde durante quince años estuvo mi círculo de operaciones como arquitecto y especialista en este tipo de construcción. Por tanto, puedo decir, sin ostentación, que no estoy hablando de algo nuevo para mí. Simplemente explicaré lo que se ha hecho en los últimos veinte o veinticinco años. En la actualidad, en Cataluña, casi un setenta y cinco por ciento de los edificios industriales son de construcción a prueba de incendios.

¿Por qué se hizo esto? ¿Fue porque estas industrias estaban respaldadas por un mayor capital, y tenían mayores facilidades o ganancias que las de América? ¿Cuál es la razón de que los fabricantes catalanes hayan dejado de construir edi-

ficios que no estén protegidos contra incendios? ¿Por qué no hacen lo mismo los fabricantes americanos? Deseo analizar y responder a estas cuestiones.

Hasta 1865 se puede decir que ni en Barcelona ni en las provincias de Cataluña había una sola fábrica que no estuviera enteramente construida, como aquí en América, de forjados de madera, y la mayor parte de ellas con columnas de madera y cerchas.[26] Algunos edificios presentaban una construcción de «combustión lenta» —una combinación de madera y de hierro. Recuerdo cuando todas las fábricas de las calles Amalia, Rierretta, Luna, y los barrios de San Pablo y San Pedro, eran de madera. Tan viejos y llenos de aceite estaban estos edificios, que el olor que emanaban estaba impregnado de peligro inminente, debido quizá al imaginar la escena de horror que produciría el fuego ante el más mínimo descuido. Casi todos estos edificios han desaparecido. Sus propietarios, con buen criterio, han construido sus fábricas más separadas entre sí, y con otro sistema, que se adapta mejor a sus intereses, el de la construcción a prueba de incendios.

Se puede pensar que estos fabricantes eran más ricos o estaban seguros en sus inversiones y que, por tanto, requerían edificios más duraderos y seguros. Pero esto no es así, ya que reciben muy poca protección, con sus mercados prácticamente abiertos a los fabricantes franceses e ingleses, y con el peligro inmediato ante cualquier ligero cambio en los aranceles. ¿Cuál fue la causa de este cambio?

Los fabricantes habían aprendido por experiencia que, a pesar del dinero pagado por el seguro, en caso de incendio la fábrica debe parar durante un tiempo, y que los clientes, si no reciben el suministro, se iban a alguna empresa de la competencia, de modo que, cuando vuelven a funcionar, lo hacen prácticamente desde cero. También sabían que la durabilidad y la depreciación de un edificio de madera durante cinco años iguala el coste extra de uno protegido contra el fuego. Una fábrica que cuesta 20.000 dólares y que hay que reconstruir a los veinte años, supone destinar un cinco por ciento al año para restaurarla periódicamente. Esto significa que en cinco años la fábrica ha costado 25.000 dólares, tanto como una a prueba de incendios. Todas estas consideraciones y las exigencias cada vez mayores de las compañías aseguradoras contra el fuego, que las reflejaban con extremo cuidado en la emisión de las pólizas, obligaron a los fabricantes a darse cuenta del valor de la protección contra incendios, y presionados por estas necesidades algunos de ellos decidieron aplicarla en sus fábricas.

Pero hacia 1865 los fabricantes catalanes se encontraban en la misma situación que los americanos. Sólo conocían las fábricas inglesas, aparentemente resistentes al fuego gracias al uso de soportes de hierro y pequeñas bóvedas de ladrillo, caras y sin protección real, con las dificultades inherentes a este sistema que se refieren al movimiento del eje, en el que cualquiera de las frecuentes alteraciones que exige cualquier fábrica requiere un enorme esfuerzo. Dándose cuenta de este inconveniente, los fabricantes de Cataluña no pasaron bruscamente de un extremo a otro, es decir, del más pobre al más caro. Tomaron medidas para que ningún cambio repentino pudiera arruinarles. Comenzaron a estudiar la forma de superar los inconvenientes del sistema inglés de protección contra el fuego en los edificios industriales y a buscar un sistema tal que se ajustase a la conveniencia de los fabricantes, y evitase las grandes pérdidas causadas por el cierre de las fábricas, que las compañías de seguros no podían pagarles. Nadie puede criticar esta prudencia, porque el capital invertido en la fábrica es la herramienta de los fabricantes, como el martillo y el formón en manos del obrero. No pueden, no deben gastar más de lo estrictamente necesario ante la más mínima posibilidad de pérdida. Y gracias a su prudencia tienen ahora, como dije, más del setenta y cinco por ciento de sus edificios protegidos realmente contra el fuego.

Este sistema de protección contra incendios consistía en una combinación de cerámica con madera o cerámica con hierro, en crujías de unos 3,20 m o más. Debo señalar que, de cada diez fábricas protegidas contra el fuego, ocho estaban construidas con cerámica y madera, y dos con cerámica y hierro. La elección de esta combinación de madera y cerámica frente al hierro y el acero no se debía tanto al coste como a la confianza de que se comportaba mejor ante el fuego, además de ser más adaptable y flexible ante posibles cambios y alteraciones. La madera, eso sí, se reducía a la mínima cantidad, y se colocaba de modo absolutamente seguro. Una de éstas fue la empresa de los hermanos Batlló, en Sarriá, para quienes dibujé los primeros planos de fábrica ya citados. Ésta tuvo tanto éxito que en seguida se levantaron otras aplicando el mismo principio.

Ahora bien, si estos hombres no hubieran sido prudentes en este tema, y en lugar de escoger esta combinación hubieran tomado la extravagante decisión de

elegir pesado sistema inglés de hierro y cerámica, habrían obtenido mejoras sólo teóricas, pero no reales. El dinero es la clave del problema y, aunque el fabricante tiene nobles aspiraciones al progreso y la mejora, sabe que debe respetar unos límites prudentes. Me he extendido sobre esta cuestión, dada su importancia.

Así, se construyeron en Cataluña dos tipos de fábricas protegidas contra los incendios. El primero corresponde a la fábrica de Vidal Hijos, construida en 1871, la fábrica con husos de los hermanos Batlló, en 1869, entre otras. El otro tipo aparece en la sala principal de los hermanos Batlló, la fábrica de lana de Carreras, etc. El primer sistema consiste en vigas de madera y bóvedas de ladrillo; y el segundo, en arcos de ladrillo a modo de nervios, con pequeñas vigas de hierro y cúpula cubriendo el espacio intermedio. (Figs. 49–51)

¿Cuál es la combinación correcta: hierro y cerámica, o madera y cerámica? Es muy simple: vigas de hierro o madera, apoyadas libremente sobre columnas a la distancia regular de una nave de la fábrica —3,20 m, como ya se ha dicho— y entre ellas bóvedas de ladrillo, similares a las que actualmente pueden verse en la Biblioteca Pública de Boston, el edificio Harcourt o los Exeter Chambers, todos ellos en Boston.

La variante con hierro puede realizarse de dos modos: como se hizo en algunas de las estancias de la Biblioteca, donde trabaja a flexión como viga o cercha; o, como en el edificio de la Compañía Telefónica de Colorado, en Denver, y el edificio de la Young Women's Christian Association, en Nueva York, donde trabaja principalmente a tracción. Ésto último puede verse también en algunas de las salas de la Biblioteca de Boston. Cuando la variante es con madera, trabaja a flexión, como en el caso del hierro, y en algunos casos a tracción. La construcción es más barata cuando ambos materiales trabajan a tracción.

Se puede pensar que la protección contra incendios en Cataluña resulta más barata que en América. En general esto no es así, ya que si se hubiera aceptado el sistema inglés, la relación entre el sistema inglés y el cohesivo habría sido la misma que en América. Se puede suponer entonces que el sistema cohesivo es más caro en América que en España. Mostraré en qué radica la diferencia. No puede ser en la mano de obra, ya que existe la misma proporción entre los jornales de los carpinteros y los de los albañiles. Como los muros son los mismos en ambos

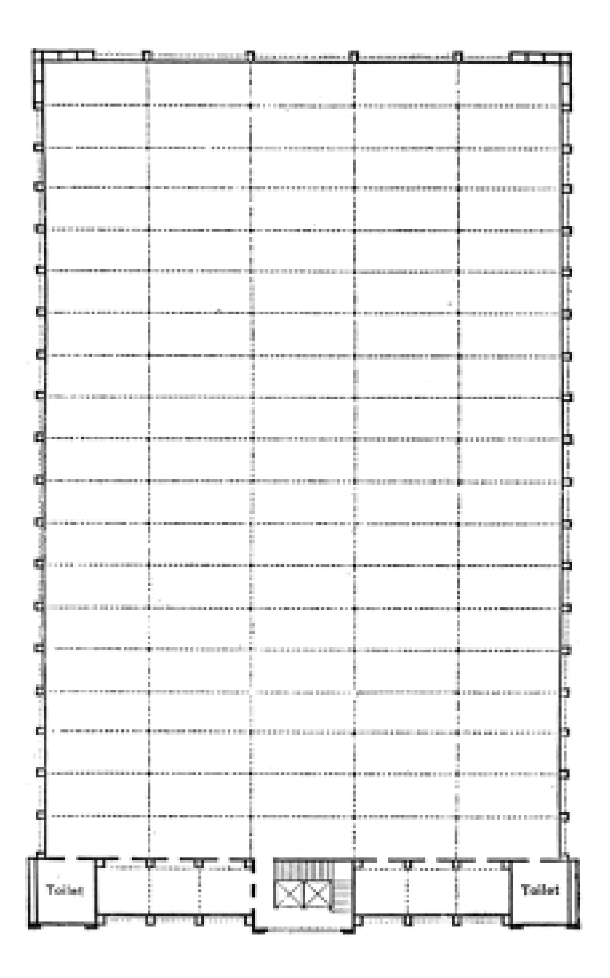



Figura 49
Planta de una fábrica

casos, la diferencia radica solamente en los forjados, y si hubiera alguna, debería estar en el material. La madera cuesta lo mismo allí que aquí. El cemento Portland, uno de los principales materiales de la construcción, cuesta tres dólares por barril en España, frente a los dos dólares y medio en América. El yeso cuesta aproximadamente lo mismo. La única diferencia aparece en el coste de las rasillas; en España se pueden adquirir por cinco dólares mil unidades, mientras que aquí cuestan quince dólares. No obstante, si se tiene en cuenta el hecho de que en

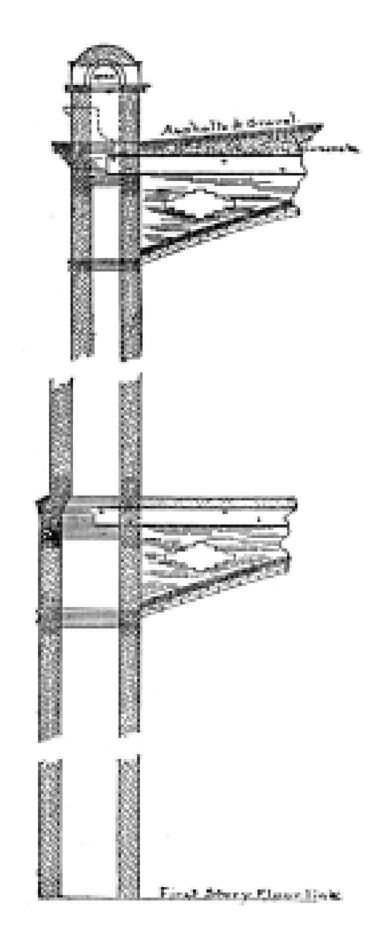


Figura 50
Sección transversal por los machones

España se usan espesores de ladrillo de 1,6 cm y aquí de una pulgada (2,54 cm), y dado que el ladrillo es sólo uno de los componentes, y que es únicamente este material especial el que aumenta el coste, la diferencia real en el precio por metro de ese material es de sólo un veinticinco por ciento. Esta diferencia del veinticinco por ciento en el coste del ladrillo no es razón suficiente para no utilizar el mismo tipo de construcción, ya que, en una fábrica de 30 × 30 m ó 900 $m^2$ la diferencia en los forjados sería de sólo ochocientos dólares. No creo que estos

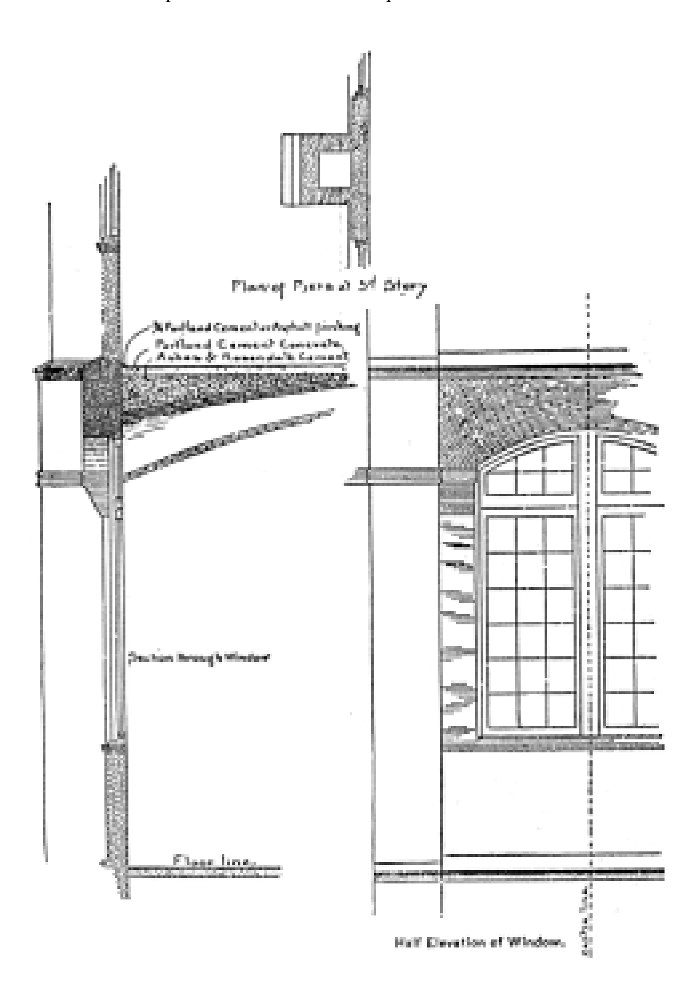



Figura 51
Planta de los machones a la altura de la tercera planta. Sección y alzado de una ventana

ochocientos dólares supongan un obstáculo insuperable para un fabricante de Nueva Inglaterra. Por lo tanto, el mayor coste no puede ser la causa. En cuanto al hierro existe una pequeña desproporción, pero como la situación económica de un país es relativa en todos los aspectos —si el hierro y la construcción son más baratos, la producción también lo es y los impuestos e interés menores—, no tiene sentido la comparación. Por consiguiente, la diferencia en el coste entre estos

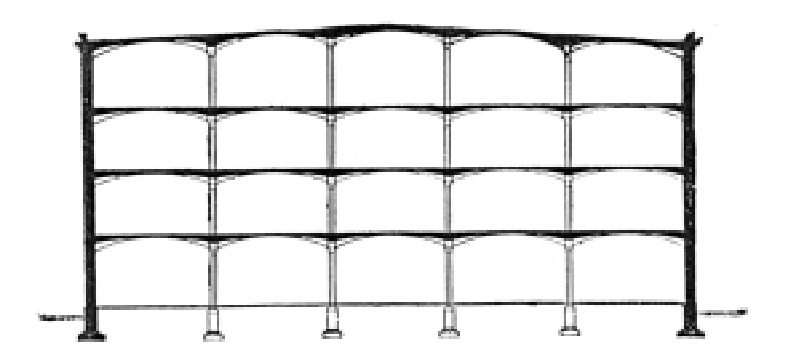


Figura 52
Sección transversal

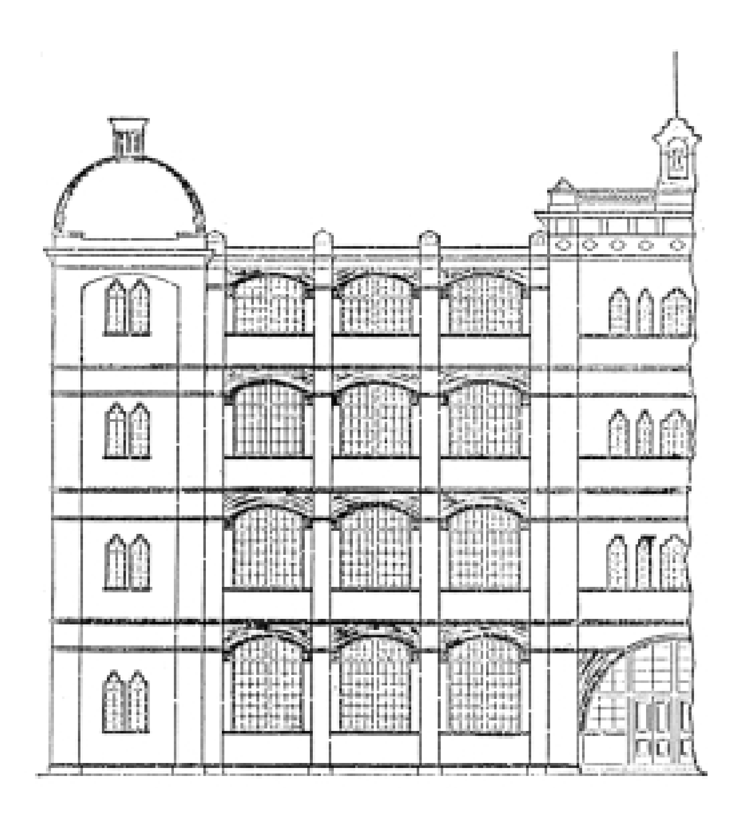


Figura 53
Alzado de una fábrica resistente al fuego

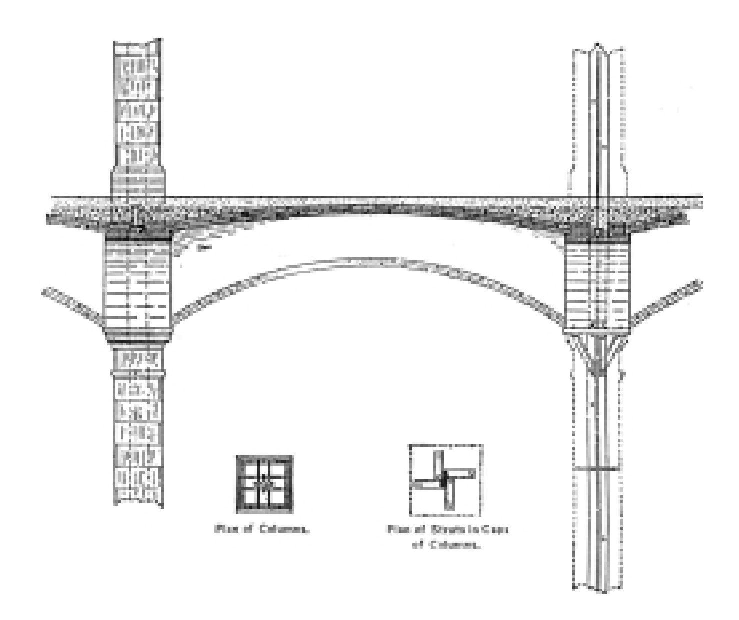


Figura 54
Sección transversal de las bóvedas

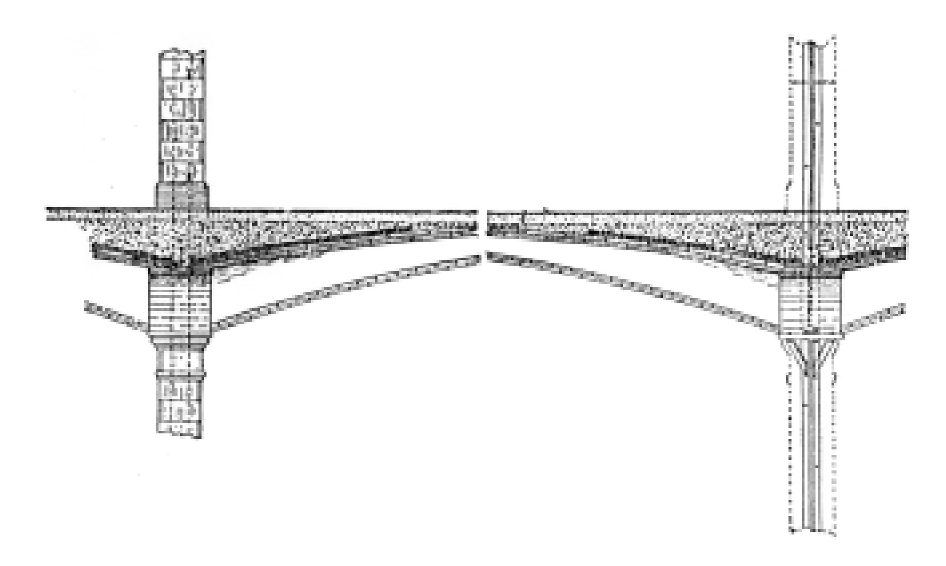


Figura 55
Sección longitudinal de las bóvedas

países entre las fábricas de madera y las protegidas contra el fuego es realmente la misma, y la razón para no elegir el mismo sistema no se debe al coste extra de ochocientos dólares por cada 900 $m^2$ de forjado.

El sistema cohesivo es el más adecuado para las fábricas por las siguientes razones:

1. Rigidez de los forjados, lo que supone un ahorro en carbón. Es evidente que la oscilación del forjado supone una perdida de potencia en las máquinas, que al cabo del año representa un consumo de carbón excesivo. En los muros y forjados de mi sistema la rigidez es absoluta, y en un edificio de gran superficie representa, como he demostrado con mis experimentos de las fábricas vieja y nueva de Muntadas, en San Martín, antes mencionadas, un ahorro neto de entre el cinco y el seis por ciento.
2. En los forjados de madera es frecuente el alabeo de este material, provocada por las variaciones de temperatura o humedad, las corrientes de aire o la proximidad de cuerpos calientes, que modifican su horizontalidad. En consecuencia la maquinaria queda desnivelada. Si no se renivela se produce entonces una pérdida de potencia, y aunque esto se haga no hay certeza de su estabilidad, ya que es posible una nueva inclinación del forjado. Lo mismo ocurre cuando la viga se pudre debido a la falta de ventilación en su extremo, lo que provoca un mal apoyo, tanto más si no se ha aplicado cuidadosamente la cal. Con frecuencia las vigas tienen que ser reemplazadas. En mi sistema todo el material es permanente, como muros sólidos.
3. Sabemos de la necesaria utilización de grasa y aceite en las fábricas, y de los peligros inherentes, sobre todo en las fábricas de algodón, a causa de su extrema combustibilidad. Todos los fabricantes necesitan espacios de gran superficie, por lo que las salidas de emergencia están alejadas con frecuencia de los lugares de trabajo y, por lo tanto, hay una amenaza constante a la seguridad. En fábricas construidas según el sistema cohesivo, el aceite no afecta a los forjados de ladrillo. Si se incendia el algodón, no tiene nada que prender; no hay elementos de hierro expuestos, todo es o cerámica o cemento (Figs. 49–55).[27]

## Almacenes, depósitos y conservación en frío

Debido a que se requieren forjados muy resistentes, en estos edificios es necesario construir lengüetas o tabiques transversales separados unos 60 cm y hasta el nivel de la clave del arco. Estas lengüetas deben ser del mismo material que el arco, y construidos, si es posible, al mismo tiempo que éste. Las lengüetas deben arrancar desde el riñón contiguo del cañón perpendicular que se apoya sobre el muro. Si no, necesitan un tirante en la parte alta que ate sus extremos. En esta clase de edificios es preferible el uso de la cúpula, que tiene una resistencia máxima para una sección mínima. Las lengüetas en la cúpula deben ser radiales, y se concectan mediante unos anillos tan altos como los nervios.

## Viviendas

Todo el mundo sabe que la finalidad de proteger contra el fuego las casas privadas es sólo para asegurarlas contra los incendios, cuando en realidad el principal valor, que ningún seguro puede garantizar, sería proporcionarles un forjado perfectamente hermético y la separación entre los apartamentos de cualquier edificio de viviendas. En la construcción en madera es prácticamente imposible evitar la aparición de fisuras en el techo y las paredes, así como la separación entre las juntas del forjado de madera. Como consecuencia, cada planta se comunica con la inferior o las habitaciones contiguas. Esto se cumple en cualquier edificio de madera y si es peligroso que el aire pase entre dos apartamentos diferentes, también lo es que en su paso comunique a los miembros de la misma familia. La medicina establece que el aislamiento es absolutamente necesario en algunas de las enfermedades comunes para prevenir su contagio.

En la puerta de los edificios de apartamentos de las grandes ciudades (quizá obligadas por una ley local) se ve con frecuencia el aviso de que se ha desarrollado alguna enfermedad en su interior, probablemente para prevenir la intrusión de las visitas. Sin embargo, eso no previene la comunicación a través de las grietas de los forjados y los tabiques. Se puede ver a menudo, a través de una grieta, la luz de la habitación inferior o la contigua. Esta grieta permite la circulación del aire infectado entre varias familias de la casa. Estos hechos hablan por sí solos.

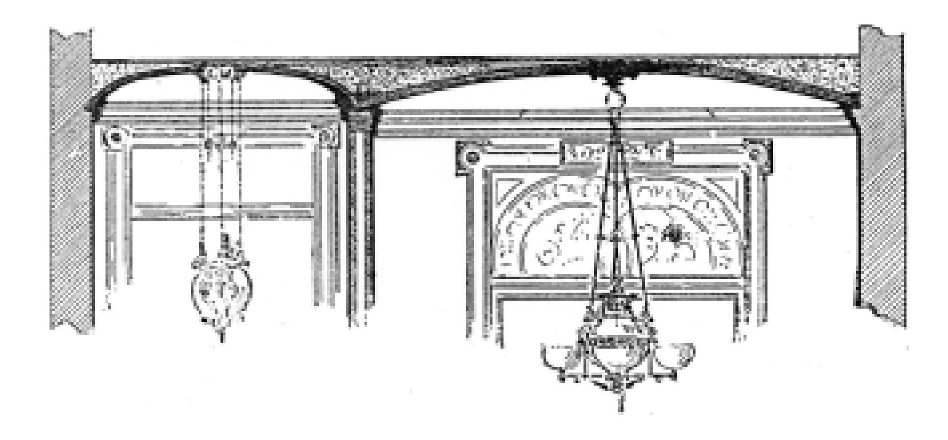


Figura 56
Sección del techo abovedado del vestíbulo y salón de una vivienda

La circulación a través de los muros y los forjados no se puede prevenir si se utiliza madera, ya que todo el mundo sabe que el movimiento natural de las vigas agrieta las cornisas y los techos. Después, cuando el forjado se seca, las juntas se abren.

El peligro de fugas se incrementa con las complicaciones que hoy suponen en los edificios normales de viviendas las tuberías de vapor, agua y gas, sin mencionar los cables eléctricos, que no pueden aislarse completamente.

La figura 56 corresponde a la sección de un edificio de viviendas, que muestra un vestíbulo y un salón. La línea de puntos de la figura 57 representa el acero estructural necesario para el techo del salón, con la construcción en ladrillo visto antes de su decoración. La figura 58 muestra esta construcción ya decorada. La figura 59 es la sección del techo, donde se representan dos soluciones: en una mitad del dibujo, el forjado nivelado con un relleno de hormigón; en la otra mitad se prescinde del hormigón para dejarlo hueco, y los durmientes están apoyados y anclados a pequeños machones de ladrillo construidos sobre la bóveda.

Recomendamos el empleo de cúpulas en las casas privadas. Primero, porque son más resistentes que las bóvedas de cañón y más baratas. Segundo, porque tienen una apariencia formal y decorativa más elegante.

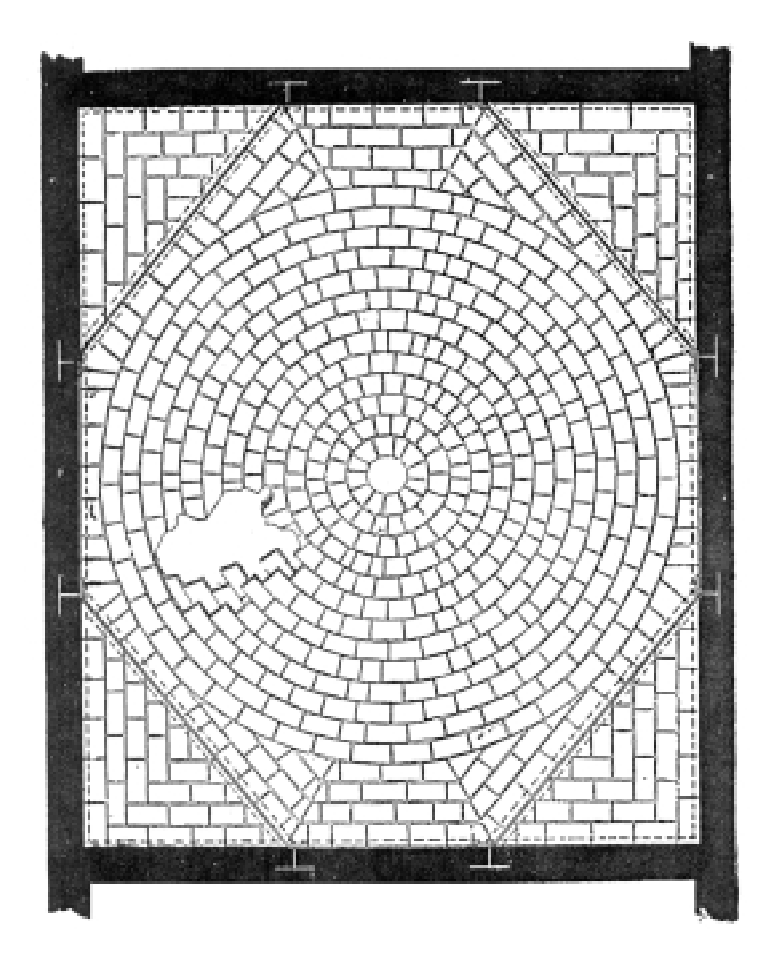


Figura 57
Cúpula rebajada en planta del salón. Muestra los zunchos metálicos en la línea dicontinua y el aparejo del ladrillo

Para resolver el problema del aislamiento, que coincide con el de la resistencia adecuada, es suficiente, por ejemplo para una cúpula de 5 a 6 m, construir sólo dos hojas de ladrillo, cada una de 1 pulgada (2,54 cm) de espesor, introduciendo, en algunos casos, nervios para conseguir una resistencia adicional.

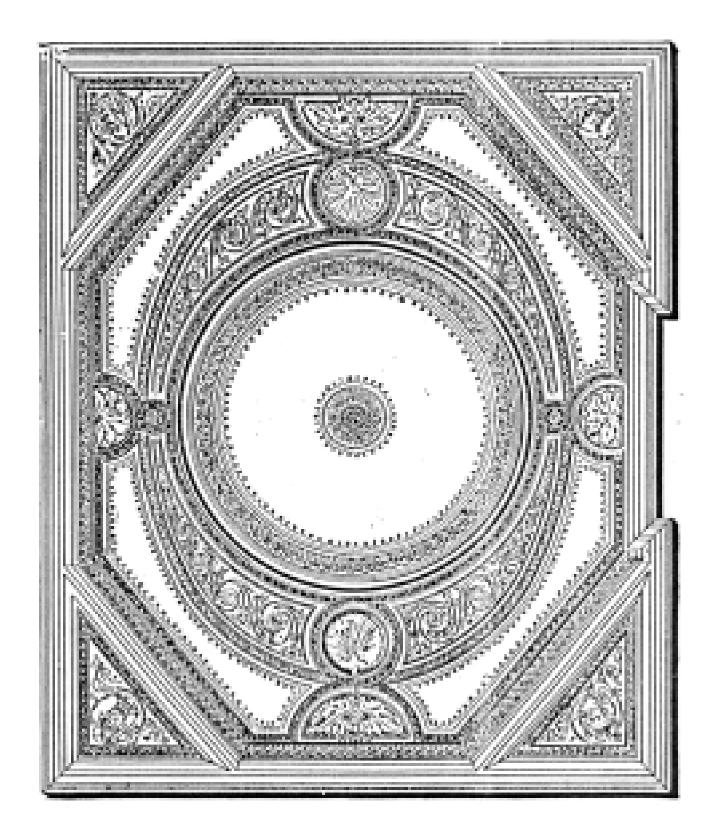


Figura 58
Cúpula rebajada del salón con la decoración. Planta

## Viviendas unifamiliares

Una de las demandas frecuentes, especialmente en Nueva Inglaterra, es la de chalets a prueba de incendios. El chalet protegido contra el fuego debe ser muy económico. Hay quien sólo quieren aislar el sótano. Para proteger del fuego toda la construcción del chalet, la cúpula es la forma más barata y apropiada.

Se pueden construir todos los tabiques con bloques de ladrillo, con la ventaja de que siempre se pueden reutilizar. Estos tabiques de ladrillo requieren marcos de cemento en puertas y ventanas. La madera prácticamente sólo es necesaria en las partes móviles de puertas y ventanas. El tejado del chalet puede ser de tejas,

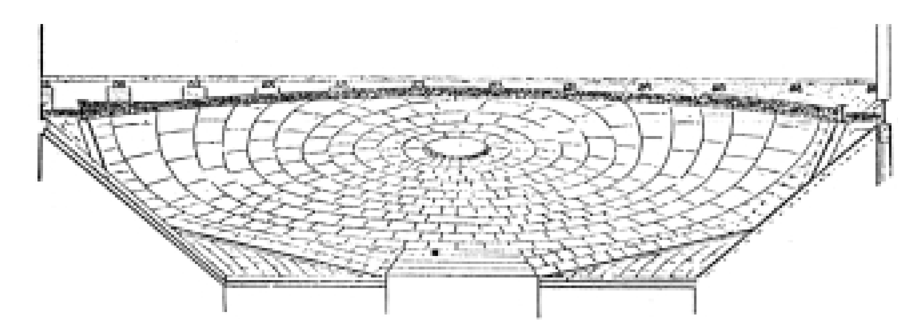


Figura 59
Sección fugada del techo del salón, mostrando dos soluciones constructivas. A la izquierda solado sobre pequeños machones; a la derecha, solado sobre relleno de hormigón

vidriadas o coloreadas, recibidas con cemento Portland. Los muros exteriores se pueden construir con grandes bloques de ladrillo y cámaras de aire intermedias.

## Hospitales y escuelas

Los forjados de los hospitales y las escuelas pueden ser dobles, con una cavidad intermedia a fin de que la ventilación se distribuya suficientemente entre el techo y el suelo, y tener así el mayor número de registros y tuberías de ventilación que alcancen a todos los rincones de las habitaciones. Esta condición requiere que el espacio intermedio entre el suelo y el techo esté vacío, para lo cual se necesitan barras muy pequeñas. La cúpula es el sistema más apropiado para este tipo de edificios, ya que las barras pueden ser muy pequeñas por trabajar sólo a tracción.

Las bóvedas de cañón no son tan ventajosas porque los riñones siempre interrumpen la comunicación con el arco contiguo, y cuando se construye un techo plano bajo el cañón, la ventilación sólo se puede realizar en sentido longitudinal para no encarecer ni debilitar la bóveda.

## Edificios de oficinas

La introducción de un gran número de plantas en las estructuras modernas sugirió a los arquitectos la construcción de forjados muy delgados, que permiten ga-

nar en altura y también en luminosidad. La utilización de cúpulas, bien combinadas, tiene grandes ventajas en este sentido.

## Escaleras

Una de las aplicaciones más valiosas de la construcción tabicada es la escalera construida según nuestro sistema (Figs. 60–61).

En general, los materiales que actualmente se emplean para las escaleras son la madera, el hierro y la piedra. La primera no resiste al fuego, el segundo lo resiste mal y ninguno de los dos posee suficiente carácter arquitectónico. La piedra es buena, pero demasiado pesada y cara para viviendas y otros edificios similares.

Las ventajas de la escalera tabicada son las siguientes:

1. Es absolutamente resistente al fuego.
2. Se adapta a cualquier espacio, grande o pequeño, y lugar donde se pueda contar con dos muros, o un muro y dos forjados.
3. Es un elemento constructivo susceptible de cualquier tipo de decoración, y proporciona una riqueza infinita de formas, sin gran coste.

Con este sistema se pueden construir dos tipos de escaleras. Una puede llamarse escalera a montacaballo; y la otra, escalera en espiral, o con pechinas en las esquinas. Pero cuando decimos escalera en espiral no sólo nos referimos a la de base circular, sino también rectangular.

La primera, como su nombre indica, es una serie de arcos catenarios, construidos, uno sobre otro, formando ángulos. La segunda es una bóveda continua desde arriba hasta abajo sin más interrupción que los muros.

La traza de ambos tipos de escaleras requiere un cierto conocimiento de su comportamiento, y resulta difícil explicar cómo determinar la forma correcta del arco de cualquiera de estas escaleras y establecer principios definitivos para un caso general, ya que los problemas varían hasta el infinito. La combinación del arranque del arco con la curva continua necesaria bajo el descansillo para ajustar el tramo colindante es una cuestión de apreciación mecánica, ya que hay que tener en cuenta el espacio requerido por los peldaños, y dar al arco la línea de empujes correcta. Por esta razón no pueden darse reglas precisas.

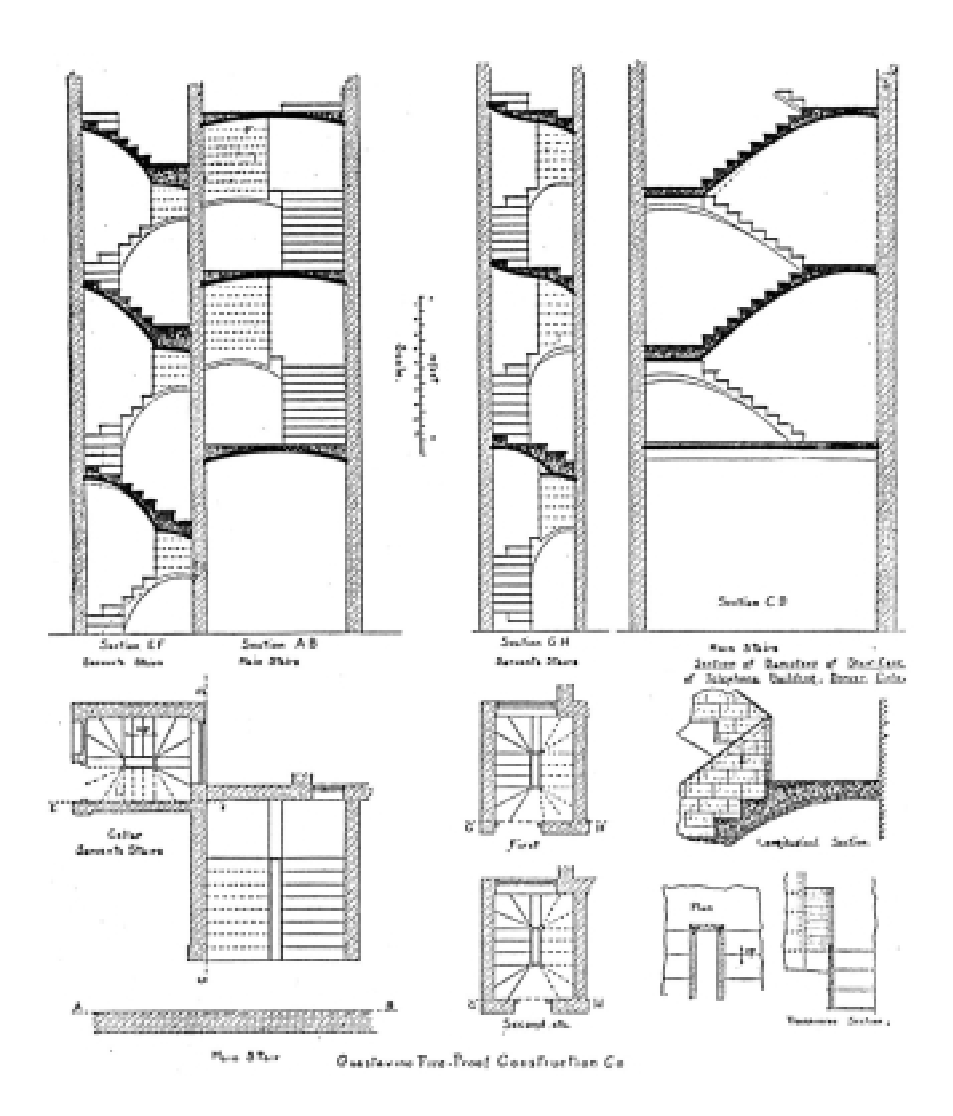



Figura 60

Escaleras en Exeter Chambers, Boston. Aquí se pueden observar las dos variantes de escaleras tabicadas

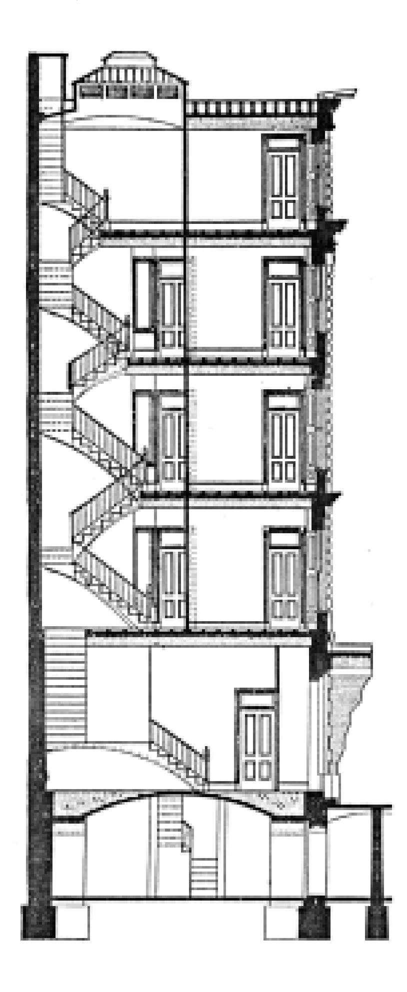


Figura 61
Escaleras en los apartamentos de la calle 100 y la avenida Columbus en Nueva York

No obstante, una de las reglas principales es que el primer peldaño debe estar en la parte más baja del arranque del arco, al comienzo del tramo. Si un tramo es más largo que la suma de los peldaños requeridos, el descansillo se deberá colocar en la cabeza del tramo y no en su arranque. Estos principios son necesarios para evitar las consecuencias de la utilización de ménsulas, que debilitan las escaleras y atentan contra su carácter.

Otro principio es que la sección transversal de cualquier tramo tiene forma de «ménsula», es decir, la bóveda de la escalera a montacaballo está limitada por dos catenarias, una más baja, en la intersección con el muro, y otra más alta, en la parte exterior de los peldaños, bajo la barandilla. Determinar la separación entre ambas catenarias es un problema de apreciación visual de la anchura y longitud del tramo, y la longitud del tramo adyacente.

La sección en ménsula para una escalera en espiral debe determinarse mediante dos líneas espirales, una más baja que la otra, la más baja junto al muro, y la otra junto a la barandilla, al borde de los peldaños.

Los problemas de las escaleras construidas con arcos tabicados son complejos y variados, y requerirían un tratado particular. Se pueden citar algunos ejemplos de escaleras: las escaleras principales de la Biblioteca Pública de Boston; las escaleras para el edificio de la American Legion of Honor, en Huntington Avenue, Boston; las escaleras en Exeter Chambers, Boston (Fig. 60); las escaleras para la residencia privada nº 122 en la calle Oeste 78; cuatro residencias privadas en los números 154, 156, 158 y 160 de la calle Oeste 82; los apartamentos de la calle 99 y 100 (Fig. 61), en la esquina de la avenida Columbus, Nueva York; y las escaleras en espiral del Washington Memorial Arch, en Nueva York.

## Puentes

Una de la más valiosas aplicaciones de la construcción tabicada o cohesiva es el puente de fábrica. Los puentes de fábrica de ladrillo, hormigón o piedra requieren costosas cimbras de madera que no se pueden suprimir, ya que la cimbra ha de ser suficientemente rígida como para recibir el peso de la fábrica y permitir un buen fraguado del material. Esto representa gran parte del coste de cualquier puente, en especial si las luces son grandes, como es el caso de todos los puentes importantes.

Con la utilización de la construcción tabicada, el presupuesto para el cimbrado es muy pequeño y la razón se comprende fácilmente. Como el principio de la construcción cohesiva en ladrillo es construir los arcos por hojas, una sobre la otra, con juntas matadas, cada hoja se convierte en una cimbra para la siguiente. De este modo la cimbra sólo es necesaria en las primeras hiladas, cuyo

peso es muy pequeño. Esta ventaja permite salvar grandes luces, establece mejores condiciones para el completo asiento del material, y es económica. Pero estas ventajas, ya mencionadas, no son las únicas que este sistema supone en los puentes.

1. En el sistema cohesivo (en ladrillo) se puede aumentar el momento flector resistido por cualquier sección sin añadir material, es decir, haciendo una sección tubular.
2. Los raíles del tren se pueden construir conectados al puente, en condiciones tales que pueden considerarse un elemento resistente más.
3. La forma tubular, así como la construcción de los raíles en conexión con el puente, resuelve favorablemente su estabilidad bajo cargas móviles.

En las figuras 62, 63 y 64 se muestran la planta y la sección de un puente. Como se puede ver, no es completamente tubular, sino sólo en los extremos, donde aumenta el momento flector resistido. Así, para cargas móviles la línea de empujes puede actuar dentro de su espesor.

Estos extremos están formados por una doble bóveda: la bóveda inferior es una cúpula continua con el radio de su superficie esférica decreciendo hacia los extremos, y por encima de ella se encuentra el segundo arco (rebajado), que alcanza el nivel del firme. Ambos arcos están conectados por nervios.

Esperamos tratar más extensamente sobre este tipo de puentes en un libro específico sobre el tema.

### Críticas al sistema cohesivo

Muchas opiniones se han emitido a favor o en contra del sistema cohesivo, como es natural cuando una nueva aplicación irrumpe en el campo de la discusión científica. A veces sucede que los mejores amigos del sistema van demasiado lejos en su entusiasmo a favor de la nueva idea que, en sus manos, resulta desfigurada o errónea. Por ejemplo, se dice:

1. Que las bóvedas tabicadas no producen empuje. Es y no es así, como se explicará después.

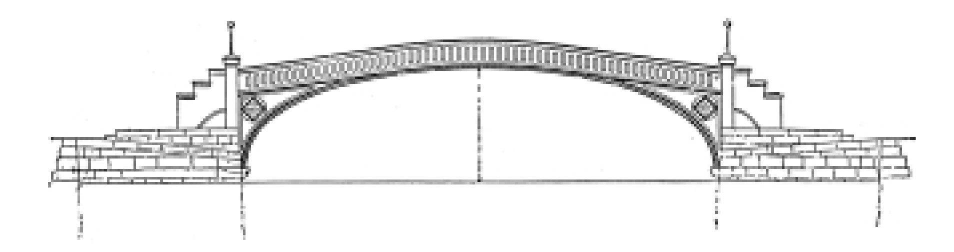


Figura 62
Alzado del puente en Lincoln Park, Lake Quinsigamond, Worcester, Mass.

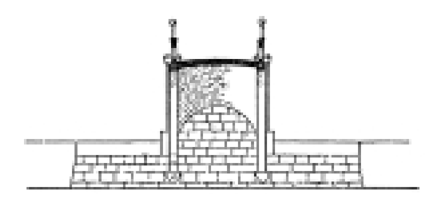


Figura 63
Sección transversal del puente

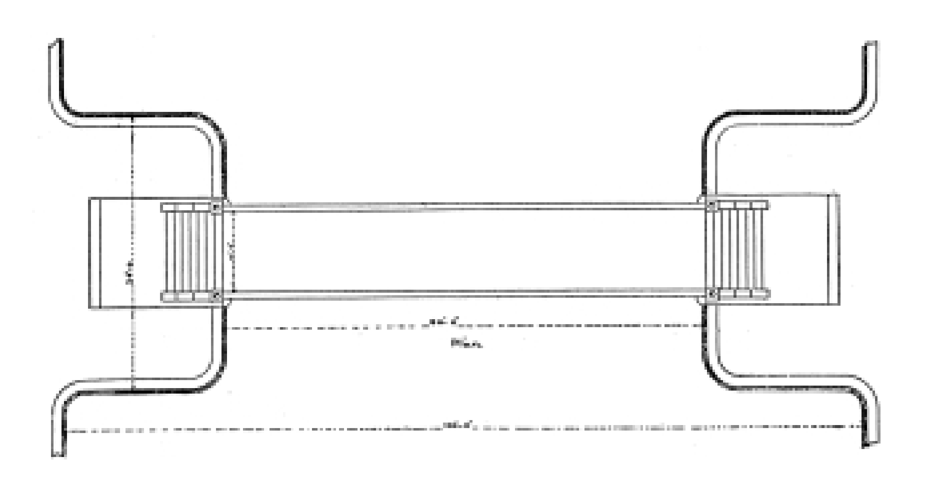


Figura 64
Planta del puente

2. Que el sistema es más caro que cualquier otro sistema de protección contra incendios, o que no supone ningún ahorro. Esto depende del modo en que se aplique.
3. Que estos techos requieren mayor altura que si se hubiesen construido de otra manera. Por lo tanto, es necesario construir todas las estancias con techos altos y esto, por supuesto, también obliga al edificio a ser más alto. Es probable que esta impresión se produzca porque algunas personas puedan haber visto arcos o techos construidos con una flecha especialmente elevada para darles más carácter o mostrar mejor el trazado constructivo, e imaginan que todos los techos deben tener una flecha similar, cuando la verdad es, que por lo general, requieren menos espacio. Ésto depende de la voluntad del arquitecto que está utilizando el sistema.[19]

Como respuesta a lo primero diré que el empuje depende de la forma y no del material, como se dijo anteriormente (véase el capítulo 2).

La respuesta a la afirmación de que es tan caro que no se puede utilizar de forma rentable es la siguiente:

1. Como dijimos antes, la bóveda de cañón produce cierto empuje y para contrarrestarlo necesita uno o varios tirantes. Ése es uno de los motivos que hace a la construcción abovedada de cañón más cara que la cupuliforme.
2. La bóveda de cañón requiere dos elementos laterales de soporte, tales como cerchas, vigas o muros. Estas cerchas o vigas deben tener la resistencia suficiente para soportar todo el peso que recibe la bóveda más el peso propio de ésta. El coste de las cerchas o las vigas deben añadirse, pues, al coste de la bóveda. Por lo tanto, tenemos el mismo problema que en el sistema habitual de protección contra el fuego, donde las bóvedas también descansan sobre las vigas, con la ventaja de que nuestras bóvedas de cañón son más ligeras y la luz puede ser mayor. Así pues, estas cerchas o vigas pueden ser más ligeras y baratas. Aún así se mantiene el hecho de que debemos colocar cerchas o vigas, y que el coste de éstas se debe añadir al de la bóveda. La conclusión es que, aunque obtenemos un ahorro sobre el sistema ordinario, las bóvedas de cañón no pueden competir con

una construcción de combustión lenta a causa de las pesadas cerchas que requieren.

3. Sin embargo, si en lugar de utilizar las bóvedas de cañón tabicadas, utilizamos cúpulas, sí obtenemos un ahorro, si se construyen adecuadamente, ya que no se producen los inconvenientes mencionados —esto es, la utilización de gruesos tirantes entre cerchas pesadas, y el uso de las propias cerchas o vigas.

Ahora bien, supongamos que llega a nuestras manos el plano en el que un arquitecto ha cubierto el espacio a base de bóvedas de cañón y cerchas, como viene a ser normal, y asignamos un precio que es más caro que para una cúpula sin las pesadas cerchas y los pesados tirantes. El resultado es que no es tan barata como otras soluciones que ya hemos construido y estamos construyendo. ¿Es defecto del sistema? Lo más probable es que no. El problema es que no está bien utilizado.

Hay que recalcar con gran satisfacción que hemos comenzado a recibir planos de arquitectos de todos los rincones del país, algunas de las cuales muestran que este sistema comienza a ser bien comprendido y apreciado en su justo valor.

En relación con el problema de la altura, puedo decir que, aunque damos un diez por ciento de flecha, como norma, para una bóveda cualquiera, eso no significa que no pueda ser menor o mayor. Al igual que en el sistema ordinario de vigas, sabemos que cuanto más alta es la sección que damos a éstas, más barato es el resultado. Por ejemplo, si en una estructura de forjado de vigas de 7,5 m de luz utilizamos vigas de canto igual al ocho por ciento de la luz, el techo será más barato que si les damos el cinco por ciento para una carga similar, ya que, en el primer caso, obtenemos la misma resistencia con menor cantidad de acero. Lo mismo ocurre con las bóvedas y las cúpulas. Cuanta mayor flecha se les da, más económicas son. Esto significa que se utilizan las mismas reglas que en los puentes habituales, que podemos reducir la flecha al ocho por ciento en la construcción ordinaria. Como la forma de la bóveda permite dar mayor altura al techo en el centro, el resultado es que en nuestro sistema los techos son en la práctica más altos que en cualquier otro, requiriendo en la clave sólo 15 cm de espesor, y aumentando hacia los laterales, ocupando finalmente el espacio de las pequeñas esquinas. Por lo tanto, no veo cómo este sistema puede ocupar más espacio que cualquier otro.

## Nota sobre las patentes

Ha surgido otra cuestión en la discusión, que contestaré con el permiso del lector, esto es, la relativa a las patentes. Ahora bien, si el sistema es patentable, ¿en qué consiste la patente, y en qué la garantiza? Respecto a lo primero debo decir que, admitiendo que en una pequeña parte de España e Italia se utilizó de forma empírica un sistema similar, a menor escala, el hecho es que en ninguna parte se utiliza para edificios públicos modernos, ya que, como se dijo, sólo se aplica empíricamente. Además, ninguna Escuela posee un sistema regular o método científico para su aplicación.

Se han introducido constantemente mejoras. Éstas son algunas:

1. La costumbre era utilizar yeso en la primera y segunda capas, y no era posible construir de otro modo. Esto suponía un exceso de yeso, muy perjudicial como todos los constructores inteligentes saben, y de ello damos una completa explicación en este libro. Yo utilicé este método durante varios años, con todos los inconvenientes que conlleva, tratando de descubrir un modo de evitarlo. Hoy día se utiliza una décima parte del yeso que se empleaba originalmente.
2. Antes ocurría con frecuencia que, a causa de la negligencia de los obreros u otros al encaramarse por encima o al colocar grandes pesos sobre el arco antes de que hubiese fraguado, o por cualquier otro motivo, algunas de las rasillas de la primera hoja amenazaban con caer tras haberse separado un poco. Ahora, si las rasillas intentaran separarse no podrían caer jamás gracias al machihembrado y, sin embargo, tienen la misma estabilidad.
3. Antiguamente las rasillas se recubrían con yeso, dejando éste como una forma rústica de áspero material, puramente constructiva. Hoy los ladrillos se emplean de una forma más útil, constituyendo al mismo tiempo la construcción y la decoración. Ésa fue una de las nobles y constantes aspiraciones del arte de la construcción. Pero llegar hasta ese punto con la rasilla no fue un problema fácil, ya que el ladrillo decorativo es el de la primera hoja, en la que es más difícil conseguir un rejuntado agradable y correcto, y el material que requiere no permite cortar ángulos rectos perfectos ni juntas regulares.

4. En varios casos, edificios industriales, mercantiles o especiales, es necesario que los techos sean planos, y los forjados muy ligeros y prácticamente insonorizados. Estas condiciones se cumplen en la actualidad gracias al sistema cohesivo.

Ahora bien, si el objeto de la ley de patentes es garantizar el trabajo intelectual aplicado a nuevos usos y mejoras, es imposible tener garantía para todas nuestras nuevas aplicaciones. Pero la protección de la ley de patentes fue invocada con ese objeto, no con el deseo de crear un monopolio, ni para obtener beneficios solamente. Puedo señalar que, aunque para algunos arquitectos el sistema es aceptable, queda muy lejos el día en que se pueda convertir en algo de uso habitual y libre práctica para toda clase de contratistas, mientras no tengamos aún a su disposición los elementos necesarios, tanto en lo que se refiere a material como a mano de obra cualificada. Por esta razón el sistema moriría si no fuera de uso restringido. Por ejemplo, supongamos que un arquitecto que conoce y cree en el sistema, convencido de su utilidad, como hay muchos en la actualidad, debiera proyectar un edificio según este sistema, por insignificante que fuera o pareciera ser. Si él pidiese presupuestos competitivos para conocer el coste, estoy seguro de que ni el arquitecto ni el propietario estarían seguros de que en la práctica el contratista fuera capaz de levantar el edificio con éxito. El arquitecto, que no tiene suficiente confianza en el contratista, ni sabe si es experimentado o no, y siendo consciente de que él es la persona directamente responsable, reconoce que será esclavo de la construcción. Por otro lado, el propietario, que sabe que el sistema es nuevo y está en manos de un contratista que no puede dar referencias sobre su conocimiento sobre la materia por su trayectoria pasada, no confiaría en él, y pagaría su dinero sin la seguridad de que el contrato es correcto y establecido con garantía. El contratista tampoco estaría en mejor situación: no podría encontrar ni el material ni los obreros en las condiciones ordinarias que otros sistemas permitirían y en consecuencia todo estaría en contra, tanto del éxito como de la economía.

Ésta es la razón de que fuera necesario acumular, año tras año, elementos de seguridad para arquitectos y propietarios, y adquirir medios para abastecer al mercado con material y mano de obra experta, formando maestros de obra, alba-

ñiles y peones capaces. El lector apreciará el coste, los grandes sacrificios y el capital invertido para superar todo esto, junto a la necesidad de dar al sistema una base científica. Todo esto no podía hacerse sin la garantía de una patente; y todo esto tenía que ser perfeccionado al comienzo del primer año de trabajo, ya que se trataba de una labor de propagación y evolución.

Se comprende con estas explicaciones que era necesario proteger el sistema, no por el deseo de crear un monopolio para obtener únicamente ganancias, sino para asegurar su éxito.

## Materiales y mejoras futuras

Mi intención no es defender el uso del hormigón en aquellas construcciones donde se requiera resistencia cohesiva, ya que supone un proceso lento. Trabaja prácticamente sólo a compresión y no hay resistencia a cortante en las juntas, ni permite un fraguado perfecto. Representa una pesada carga, en especial sobre las cimbras durante la construcción. Produce una gran cantidad de humedad en el edificio, y es muy difícil de reparar o modificar. Después de varios años de experiencia en la construcción de hormigón, con resultados nada satisfactorios, he llegado a la conclusión de que el sistema tubular, tal como se aplica en muros y techos de cerámica ligera, bien cocida, y cemento Portland de calidad, es el mejor método de construcción, el más seguro, sólido, económico y rápido para viviendas y otras clases de edificios, basado en el sistema cohesivo.

Por cerámica ligera y bien cocida entiendo una similar a la que usaban los antiguos, que, aunque tan resistente como las otras (de 10 a 20 $N/mm^2$) tiene un peso medio de 12 a 18 $kN/m^3$.

Los morteros empleados deben poseer propiedades hidráulicas, esto es, aquellos morteros que no necesitan estar expuestos al aire para fraguar, como es el cemento Portland utilizado en nuestras obras.

Los ladrillos deben tener las mayores dimensiones que un hombre pueda manejar fácilmente, y un peso tal que se pueda trabajar con ellos todo el día. Estas condiciones determinan un ladrillo de unas cuatro libras (1,8 kg) de peso (cuando se utiliza arcilla ordinaria), y aproximadamente una pulgada (2,54 cm) de espesor, y 450 $cm^2$ de superficie, o $15 \times 30$ $cm^2$. Estos ladrillos deben tener cierta porosidad

para absorber parte del exceso de agua del cemento. Se puede añadir que la resistencia del ladrillo estará entre 13 y 20 N/mm$^2$.

Debe indicarse que aún queda mucho por mejorar, y que para perfeccionar nuestro conocimiento del arte de construir es necesario pedir especialmente la ayuda de los fabricantes de materiales y los arquitectos.

Se pueden sugerir algunas mejoras. En primer lugar, los aspectos técnicos deben recogerse en un tratado, para que puedan utilizarse en las escuelas técnicas a beneficio del arte constructivo.

La segunda mejora tiene que ver con que nuestras rasillas y ladrillos son muy pesadas. La cúpula de Santa Sofía tiene algunos anillos construidos con lava (piedra pómez), y otros con ladrillo tan ligero que flotaría en el agua. Existen algunos de este tipo de cerámica en España (Barcelona y Valencia; también en Alcora, al norte de Valencia). Tal vez los pueblos que trabajan en las viejas minas de Peñíscola (Castellón) utilizaban esta clase de cerámica, pero mis investigaciones no han logrado descubrirlo. La idea de buscarla en los distritos mineros me condujo a realizar una investigación de buenas expectativas en Colorado. Tengo una muestra de allí, pero resulta pesada. Las rasillas que utilizamos para los techos son más ligeras.

El Oeste estadounidense está muy avanzado en la fabricación de cerámica cocida, aunque no tanto como España. En algunas partes de México están mejor preparados que el Este de EEUU para la construcción cerámica aplicada a fines arquitectónicos, y han prestado cierta atención al ladrillo más ligero.

Es un error creer que el ladrillo pesado es el mejor. El ladrillo ligero, que mencioné, tiene una resistecia de rotura de 15 N/mm$^2$ y flota en el agua.

## Economía en el futuro

La arcilla de los ladrillos que empleamos es aproximadamente la misma que la del ladrillo común, y el volumen es similar, de 1,8, 2 ó 2,3 kg. Nuestra rasilla mide 2,5×15×30 cm, ó 1.125 cm$^3$, y el ladrillo, 5,5×11×20 cm, ó 1.210 cm$^3$; pero tenemos que pagar entre 18 y 20 dólares por cada mil rasillas,[28] mientras que el millar de ladrillos cuesta de 7 a 9 dólares.

Si consideramos que las rasillas se fabrican en bloques de seis, que así se manejan en la fábrica con más facilidad que el ladrillo, que son más delgadas, se secan

con más rapidez y se cuecen con mayor facilidad y menos energía, parece que debieran fabricarse más baratas que el ladrillo normal. Así ocurre en España, donde el millar de ladrillos cuesta entre 6 y 7 dólares, y las mil rasillas entre 4 y 5 dólares.

Esta anomalía se debe quizá al hecho de que en EEUU todavía no ha habido suficiente demanda de estas rasillas como para abaratar su fabricación produciéndolas en grandes cantidades.

En relación con el cemento, tenemos que reconocer la gran contribución de los fabricantes ingleses al cemento Portland que utilizamos. Si se puede fabricar con garantía en este país, supongo que debería ser aproximadamente el 20 por ciento más barato. Por estos dos motivos debemos poder ser capaces de abaratar la construcción entre el veinte y el treinta por ciento.

La tercera mejora que podemos sugerir afecta a los arquitectos. En conclusión, permitidme exponeros los siguientes pensamientos, que no son míos, sino de un eminente autor inglés de principios de siglo XIX:[29]

> ¿Cuál es el mejor tipo de estructura: la que para tramos similares tiene más porcentaje de su superficie cubierta ocupada por muros sólidos, o la que tiene menor superficie ocupada? Al contemplar edificios cuya edad demuestra su solidez, se puede estimar el saber aplicado comparativamente en proporción inversa a la cantidad de material por superficie cubierta. La siguiente lista de edificios notables con la relación entre la superficie de los muros y pilares en planta y la superficie total puede ser interesante:

| | |
|---|---|
| Iglesia de los Inválidos, en París | 2/7 = 0,286 |
| San Pedro de Roma | 1/4 = 0,250 |
| San Pablo de Londres | 2/9 = 0,222 |
| El Panteón de Roma | 1/4 = 0,250 |
| Santa Genoveva, en París | 1/7 = 0,143 |
| Catedral de Salisbury | 1/5 = 0,200 |
| Templo de la Paz | 1/7 = 0,143 |
| El Partenón | 2/11 = 0,182 |
| Santa Sofía, en el sistema cohesivo | 1/8 = 0,125 |

> Un gran edificio con pocos materiales, además de la aprobación periódica que recibirá del paso del tiempo, tendrá por lo general una superioridad indiscutible.

A continuación presentamos una tabla calculada por D. Gaetano Lanza, Doctor de Mecánica Aplicada en el Instituto Tecnológico de Massachusetts.[30] Da las tensiones en libras por pulgada cuadrada para arcos tabicados con una flecha del

| Span in Feet. | Rise in Inches. | Thickness in Inches. | Area of Sec., 12 in. wide. | I of Section, 12 inches wide. | Bending-moment at crown. Inch pounds = w × | Stress due to bending-moment = w × | Thrust at crown = w × | Stress due to thrust at crown = w × | Thrust at springing = w × | Stress due to thrust at springing = w × | Maximum stress at crown = w × |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 6 | 2 | 24 | 8 | .540 | .0675 | 6.16 | .25667 | 6.673 | .278 | .32417 |
| 5 | 6 | 3 | 36 | 27 | .540 | .03 | 6.16 | .17111 | 6.673 | .18536 | .20111 |
| 6 | 7.2 | 3 | 36 | 27 | .7776 | .0432 | 7.392 | .20533 | 8.008 | .2227 | .24853 |
| 7 | 8.4 | 3 | 36 | 27 | 1.0584 | .0588 | 8.624 | .23956 | 9.3125 | .2595 | .29836 |
| 8 | 9.6 | 3 | 36 | 27 | 1.3824 | .0768 | 9.856 | .27378 | 10.677 | .2966 | .31458 |
| 9 | 10.8 | 3 | 36 | 27 | 1.7496 | .09719 | 11.088 | .30800 | 12.013 | .3372 | .40518 |
| 10 | 12.0 | 3 | 36 | 27 | 2.16 | .12 | 12.320 | .34222 | 13.346 | .3707 | .46222 |
| 11 | 13.2 | 3 | 36 | 27 | 2.6136 | .1452 | 13.552 | .37644 | 14.508 | .4055 | .52164 |
| 12 | 14.4 | 3 | 36 | 27 | 3.1104 | .1728 | 14.784 | .41067 | 16.016 | .4449 | .58347 |
| 12 | 1.44 | 4 | 48 | 64 | 3.1104 | .0972 | 14.784 | .308 | 16.016 | .3337 | .4052 |
| 13 | 1.56 | 4 | 48 | 64 | 3.6504 | .1140 | 16.016 | .33367 | 17.351 | .3615 | .44767 |
| 14 | 16.8 | 4 | 48 | 64 | 4.2336 | .1323 | 17.248 | .35933 | 18.685 | .3768 | .49163 |
| 15 | 18.0 | 4 | 48 | 64 | 4.860 | .15187 | 18.480 | .38500 | 20.02 | .4171 | .53687 |
| 16 | 19.2 | 4 | 48 | 64 | 5.5296 | .1728 | 19.712 | .41067 | 21.355 | .4449 | .58347 |
| 16 | 19.2 | 5 | 60 | 125 | 5.5296 | .1106 | 19.712 | .32853 | 21.355 | .3559 | .43913 |
| 17 | 20.4 | 5 | 60 | 125 | 6.424 | .1285 | 20.944 | .34907 | 22.689 | .3781 | .47757 |
| 18 | 21.6 | 5 | 60 | 125 | 6.9984 | .13977 | 22.176 | .36960 | 24.024 | .4004 | .50937 |
| 19 | 22.8 | 5 | 60 | 125 | 7.7976 | .15595 | 23.408 | .39013 | 25.359 | .4225 | .54608 |
| 20 | 24.0 | 5 | 60 | 125 | 8.64 | .1728 | 24.64 | .41067 | 26.693 | .4449 | .58347 |
| 20 | 24.0 | 6 | 72 | 216 | 8.64 | .12 | 24.64 | .31222 | 26.693 | .3707 | .46222 |
| 21 | 25.2 | 6 | 72 | 216 | 9.5256 | .1323 | 25.872 | .35933 | 28.028 | .3893 | .49163 |
| 22 | 26.4 | 6 | 72 | 216 | 10.4544 | .1452 | 27.104 | .37644 | 29.363 | .4079 | .52164 |
| 23 | 27.6 | 6 | 72 | 216 | 11.4264 | .1587 | 28.336 | .39356 | 30.697 | .4263 | .55225 |
| 24 | 28.8 | 6 | 72 | 216 | 12.4416 | .1728 | 29.568 | .41067 | 32.032 | .4449 | .58347 |

Tabla 1.
Tensiones teóricas para arcos con el 10% de flecha y carga uniforme en libras por pie cuadrado. Para obtener momentos flectores, tensiones y empujes en las últimas siete columnas, multiplicar las cantidades de cada columna por la distribución superficial de la carga en libras/pie$^2$, incluyendo el peso del material.[31]

diez por ciento de la luz que soportan una carga uniforme de una libra por pie cuadrado. La resistencia se dedujo de los ensayos ya mencionados (capítulo 3) como resistencia última.

Al calcular la carga segura que podría colocarse sobre los arcos, utilizamos el diez por ciento de éstas resistencias últimas, introduciendo así un factor mucho mayor de seguridad que el normalmente empleado en tales cálculos. Realmente los arcos pueden resistir tensiones entre un quinto o un cuarto de la resistencia última del material con perfecta seguridad.

Para determinar la carga uniforme segura por pie cuadrado en la tabla de tensiones, tan sólo es necesario dividir la resistencia segura[31] de 206 libras/pulg$^2$ (ó 14,21 N/mm$^2$, véase pág. 33 más arriba) por la máxima tensión en la clave, tomada de la última columna de la tabla. Para una luz de 3 m (10 pies) y 7,5 cm (3 pulgadas) de espesor tenemos 206/0,46222 = 446 libras por pie cuadrado de carga segura, esto es, unos 22 kN/m$^2$.

# Función de la fábrica en la construcción moderna

# Prefacio

Los siguientes Prolegómenos, que forman el comienzo de un breve trabajo que aparecerá en intervalos desiguales en pequeños volúmenes, según el tiempo y la salud me lo permitan, tienen por objeto llamar la atención de los arquitectos jóvenes hacia el estudio de los problemas que se presentan en el noble Arte de la Construcción de Fábrica, un tanto injustamente eclipsado por circunstancias diversas. Los arquitectos con mucha experiencia difícilmente encontrarán nada nuevo en este libro y, antes bien, recibiremos con agrado toda indicación o enmienda que nos quieran comunicar como fruto de su experiencia, con lo cual nos harán una distinción que ambicionamos y aceptamos con el más sincero reconocimiento.

Nueva York, noviembre de 1895

# 1
# Prolegómenos

Una de las publicaciones más importantes hechas sobre los progresos en el arte de la construcción, publicada entre los últimos quince o veinte años, es la de A. Choisy acerca de *El arte de construir en Roma.*[1] Este libro es importante no sólo por las inagotables y analíticas investigaciones que contiene, sino por solicitar una vez más la atención de los arquitectos contemporáneos hacia el estudio de los principios de la construcción de fábrica, que siempre han sido, y deben seguir siendo, los típicos y genuinos por los que se manifiesta el arte arquitectónico.

Se han publicado muchas e importantes obras sobre este asunto. Han surgido controversias, agitadas principalmente por animosidades personales, pero nada ha aparecido tan práctico y competente como la obra de Choisy. Es de especial interés en un país tan rico y progresista como es Estados Unidos, que aún sigue pertinazmente adherido al uso de la madera como material de construcción a pesar de que el arte de construir está ahora en una época de hierro, arcilla y cemento.

Tal vez esta predilección por armazones de madera en la construcción surja de la adaptabilidad, mucho mayor que la de la fábrica, así como de su coste más bajo como materia prima. La madera posee además la importante ventaja de ser ella misma su propio «material auxiliar» durante el proceso de construcción.

Estas importantes condiciones, junto con la indemnización por daños causados por el fuego que ofrecen las compañías de seguros libremente y a no muy alto precio, y la dificultad de encontrar arquitectos que conozcan algo más que los meros rudimentos de la albañilería (debido a que la mayoría han fijado su residencia en las grandes ciudades al considerarlas como los únicos puntos donde sus conocimientos se pueden utilizar) han hecho permanecer estancada la verdadera construcción de fábrica. Ésta se encuentra muy generalizada en otros países mientras que aquí está todavía en su infancia. Aun en este caso su aplicación no es lo que debería ser; los materiales más sólidos y resistentes no han sustituido lo suficiente a este material perecedero que es la madera.

Sin embargo, la construcción de fábrica comienza a abrirse paso actualmente en este país. Se está imponiendo del mismo modo que lo hizo en todas las civilizaciones nobles y progresistas durante los siglos pasados. Lo consigue no sólo por su seguridad contra el fuego, sino también por constituir una prueba innegable de progreso moral. Este es el único medio que puede satisfacer la aspiración de cada edad que se sucede, de transmitir a las futuras generaciones sus propias condiciones y existencia.

Desde el momento en que el arquitecto está especialmente encargado del desarrollo y expresión de las ideas tangibles de su época, debería sentir la necesidad —más aún, la obligación moral— de transmitir a las generaciones futuras, en materiales duraderos y permanentes, la aspiración artística más elevada de su tiempo. Esta misión, aunque la pueda sentir profunda y sinceramente el arquitecto, lo mismo que el escritor o el pintor, no la puede satisfacer por la imitación e imperfección de los medios de que dispone. Por esta razón, el estudio de la arquitectura debería ir unido al de la construcción, ya que el uno es el complemento del otro, del mismo modo que la gramática y la retórica son complementarias del arte del escritor.

La introducción del hierro en la arquitectura no releva al arquitecto del estudio de las construcciones de fábrica, a pesar de que desde hace varios años se ha pensado así, con gran perjuicio para el arte de construir. Es cierto que hacia 1875 el hierro se consideraba como un material de construcción noble. Se creyó que su empleo resolvería el problema de hacer un edificio indestructible por el fuego, mas los hechos han demostrado lo falso de esa creencia. El hierro no puede expo-

nerse directamente a la acción de los elementos, al contrario que la arcilla cocida y otros materiales semejantes, ni tampoco puede soportar los incendios. Se acepta ya completamente que el hierro debe estar protegido por fábrica sólida, del mismo modo que la Naturaleza utiliza la carne y la piel para la ayuda y protección de los nervios, tendones y huesos. Se comunica además una resistencia adicional a la estructura mecánica interna por medio de una envoltura externa y artística.

Pero los jóvenes americanos que estudian arquitectura, lo mismo que los jóvenes obreros de construcción, en especial los albañiles, tienen grandes dificultades que superar. Han nacido y se han criado en edificios de madera, como lo son las escuelas, los ayuntamientos e iglesias. Se han acostumbrado a ver y admirar esos edificios, a la edad en la que la Naturaleza ejerce sus más poderosas facultades de observación y en la que las impresiones dejan la huella más profunda. Este hecho por sí solo basta para explicar el sentido según el cual los jóvenes arquitectos y albañiles conciben la construcción de fábrica. Apenas entienden los conceptos fundamentales del trabajo de albañilería, que son los de homogeneidad permanente y carácter rígido. La consecuencia inmediata es el deterioro prematuro, en el caso de que los planos no se hayan meditado bien o no se hayan realizado de acuerdo con los más estrictos principios de estática comparados con los que se emplean en la construcción de madera.

Otra causa principal de la tendencia en los arquitectos americanos hacia el proyecto en madera es la elección del medio más fácil, cuando se exige de ellos algún esfuerzo digno, para aproximarse al estilo clásico llamado generalmente «colonial». Algunos arquitectos jóvenes buscan asistencia en los llamados albañiles contratistas, a quienes atribuyen un mejor conocimiento de la albañilería del que ellos poseen. Sin embargo, la mayor parte ignora las exigencias que la construcción de fábrica, prácticas rudimentarias y viciosas y, salvo algunas excepciones inteligentes y honrosas, aplica. Así, el arquitecto joven está en situación semejante a la del poeta provinciano que se ve obligado a vestir sus pensamientos, a menudo brillantes y originales, con el lenguaje regional.

En estas condiciones, no es sorprendente que hasta los más aptos y prudentes de los jóvenes arquitectos americanos, que desean comprender las maravillas del arte de la fábrica descritas por Choisy, sientan que sus bellezas son meros sueños para ellos y el mecanismo de la construcción un enigma que está fuera de su al-

cance y que no es de su época, mientras se consuelan creando imitaciones vulgares por medio de una construcción falsa.

Se puede argumentar que hay academias y escuelas de arquitectura para los estudiantes jóvenes y, más aún, que se conceden becas a los que deciden estudiar en el extranjero; pero no es bastante. En las academias y escuelas de Arquitectura hay escaso tiempo para el aprendizaje del dibujo y el estudio de la Historia de la Arquitectura, así como para familiarizarse con algunas construcciones clásicas y obtener algunos conocimientos sobre materiales y edificación. Todo esto es necesario, pero no suficiente. En sus estudios en el extranjero, siempre cortos y precipitados, los estudiantes se encuentran con los mismos o con otros edificios clásicos; los analizan y los copian igualmente. Esto les hace bien, pero sigue siendo insuficiente.

Nos explicaremos. Todos sabemos que para formar en una nación el gusto por el drama musical y el deleite juicioso de poder saborear el gran arte lírico, lo mismo que para crear una música nacional, tenemos que comenzar por disponer de los indispensables elementos que cooperan a la formación del buen gusto. Esto no puede realizarse en las academias con cantantes y directores importados, ni con música clásica, ni enviando estudiantes a Milán o Leipzig. Se requiere algo más: hay que fomentar la música popular, asentar las bases de esta música con la balada, la canción, la opereta, y promover la formación de artistas nacionales para el concierto, la ópera, el oratorio y la sinfonía.

En la pintura, con el objeto de llegar a producir pintura histórica y de género, es necesario animar a la ejecución de cuadros que se inspiren en la vida doméstica y en el espíritu familiar, al igual que la pintura mural, decorativa e industrial. Así se contribuye al incremento del interés público y al amor por la ilustración gráfica.

El mismo plan de desarrollo debe llegar a obtenerse en la arquitectura. Las construcciones de fábrica, como el ayuntamiento, la escuela o la iglesia —no importa la sencillez con que se edifiquen siempre que ostenten un carácter noble y permanente—, deberían ser los precursores de la arquitectura de una época, a no ser que ésta fuese sólo de transición y de parodia, en vez de serlo de arte verdadero, porque esos modestos edificios son los elementos más seguros de la verdadera arquitectura en el porvenir de cada civilización.

Es cierto que en las ciudades más pobladas las ordenanzas municipales obligan a construir los muros exteriores con materiales de fábrica, generalmente de ladrillo. Sin embargo, se permite construir las divisiones interiores y los forjados a la manera tradicional, con madera. Aunque este modo proporciona empleo a los albañiles en lo que respecta a la cimentación y al aparejo de ladrillos de los muros, no proporciona, sin embargo, ningún conocimiento exacto al operario, ni el nuevo arquitecto puede obtener ningún provecho de este sistema de construcción mezclado y vicioso. Por el contrario, este sistema es una nueva fuerza para destruir los instintos artísticos y las luces intelectuales que se puedan haber adquirido en la academia. En estos centros de enseñanza se dan las ideas, no sólo en lo que se refiere a construcción en sí misma, sino también en lo referente a la higiene y otras aplicaciones a la construcción, cuyas condiciones óptimas sólo pueden obtenerse mediante el empleo de la fábrica completa y sólida, tal y como se hace en otros países. Usada en esta forma económica, no sólo podrían construirse de fábrica las iglesias y escuelas de las poblaciones más pequeñas, sino también las viviendas de las clases trabajadoras más humildes.

Uno de los miembros más sobresalientes de la aristocracia intelectual de Boston y ex-presidente de la Junta de Obras nos hizo hace algún tiempo una observación totalmente razonable acerca del único edificio en los Estados Unidos sobre el cual la Junta y los arquitectos fueron unánimes en reconocer, hasta donde les es posible, que cuando un pueblo construye edificios debe tener presente no sólo lo que un pueblo culto se debe por las lecciones del pasado al presente, sino lo que debe ser legado a las futuras generaciones:

En mis diferentes viajes a Europa, nunca había podido recorrer la parte sudoeste del viejo mundo hasta el año pasado. Ahí fue donde recibí las impresiones más fuertes en diversos aspectos. Lo que más cautivó mi atención fue la variedad, la solidez y creo que también lo económico de las construcciones de fábrica. No me explico por qué no podemos encontrar entre nosotros la imitación de esta clase de construcciones, ni en los Estados del Centro, ni en los del Sur, ni tampoco aquí, en los del Nordeste. Aprovecharé la primera oportunidad para mí mismo, porque entiendo que tenemos en el país todos los materiales necesarios que son más comunes en todas partes y que pueden utilizarse de la manera más simple. Los edificios que vi en esa región de Europa están bien preparados tanto para el

verano como para el invierno, y es para mí un asombro que ese estilo no se haya adoptado aquí rápidamente.

La respuesta es muy simple: precisamente por el hecho de que los materiales empleados son de los más económicos, necesitan desde luego una ingeniosa y experta manipulación para adaptarlos y usarlos con eficacia. En los tiempos que corremos estamos tan acostumbrados a dar a todas las cosas el sello del siglo XIX, quizás únicamente para beneficiar a negociantes intermediarios, que son muy escasas las personas que se dan cuenta del hecho de que los materiales para la construcción de fábrica comunes y abundantes son los más convenientes, más baratos y adecuados para lograr el objeto que debe proponerse la construcción. Lo malo es que nos preocupamos demasiado por los materiales costosos, dominados por la impresión de que estos son sin duda los mejores.

En arquitectura, lo mismo que en la música, es más necesario disponer por niveles los elementos indispensables que en la escultura o la pintura, porque en estas últimas el artista es por sí mismo el ejecutor directo, mientras que en música o mrquitectura se necesitan intérpretes que sean el medio a favor del cual pueda representar sus ideas al público.

El músico profesional generalmente hace sus estudios en academias públicas o privadas, donde lo mismo directores que compositores, trabajan en contacto con alumnos que estudian instrumentos de cuerda y de viento. Los cantantes marchan sobre los mismos principios que el compositor sin que parezcan extraños unos a otros. Antes bien, son elementos de verdadero progreso, identificados con la misma misión dentro del arte que profesan. Por otra parte, el director y compositor, habiendo estado en contacto con todos los ejecutantes, conoce los puntos débiles y brillantes de cada instrumento y las voces que tiene que emplear. De este modo, entre todos forman el conjunto de los eslabones de una cadena intelectual, algo así como los miembros de una hermandad religiosa dentro del arte, unidos en espíritu aunque moviéndose en esferas distintas. Este mismo sistema se practicó en un tiempo en la arquitectura.

¿Puede obtenerse hoy día semejante práctica? En la arquitectura se precisan ayudantes: albañiles, carpinteros y ferrallistas, capataces y mecánicos en diferentes secciones, así como escultores y modeladores, artistas, decoradores, etc. El arquitecto necesita estar familiarizado con todos estos subordinados, que son el

medio de que se vale para materializar su proyecto. No basta la teoría: se necesita una percepción delicada y un conocimiento perfecto de la naturaleza de los materiales y de los elementos de ejecución. Este es el único medio posible para alcanzar la originalidad artística.

Por estas razones es evidentemente necesario que los arquitectos jóvenes estén en contacto íntimo con todos esos elementos a través de un sistema de estudio semejante al seguido en las academias de música. Es decir, se estudia la teoría y la práctica bajo la dirección de la academia, por cuyos medios los arquitectos jóvenes, capataces de distintos departamentos, canteros, albañiles, modeladores, pintores, escultores y decoradores se ponen en contacto con todos los elementos de construcción, siguiendo la práctica de la Edad Media, cuando todo edificio era una especie de escuela de arquitectura en la que los aprendices o estudiantes eran a la vez los obreros.

Este sistema, combinación de estudio y ejecución, es cada día más necesario en vista de las modernas y complejas estructuras y sus elementos heterogéneos. Sin embargo, no existe ninguna escuela establecida sobre estas bases. En Alemania e Inglaterra se nota alguna tendencia en tal sentido, pero es un mero ensayo; sólo se prueba que es posible fundar dicho sistema de manera digna y positiva.

Acaso dirán algunos que estas ideas pecan de exageradas y que sólo el genio puede triunfar sobre las dificultades en cualquiera de las Bellas Artes. Otros pensarán que a un arquitecto le basta con saber dibujar correctamente un capitel o una puerta clásica, del mismo modo que hay quien opina que todo correcto rimador es un poeta. Pero esta es una ilusión peligrosa porque ni la versificación es la poesía ni la facultad de copiar fragmentos arquitectónicos y edificios es la verdadera arquitectura.

El rimador inculto o el simple dibujante no puede llegar jamás a producir ninguna obra artística digna del espíritu de nuestra civilización, como tampoco la manzana silvestre agria puede brotar del mismo árbol cultivado que produce un fruto aromático y delicioso. Es muy cierto que si los arquitectos romanos no hubiesen estado preparados de la manera que defendemos, Choisy no hubiera podido contar con los monumentos de aquellos artistas remotos como valiosos objetos de estudio, ni habría sido capaz de dar a la humanidad unas enseñanzas tan interesantes.

Como se ha dicho, no sólo beneficia a los nuevos arquitectos el promover e inaugurar el establecimiento de escuelas y la construcción de iglesias y otros edificios en buena fábrica. Estos edificios, al ser revisitados en las prácticas y enseñanzas, teóricas y prácticas de la academia, serían además de gran importancia para los trabajadores, al hacerles comprender los conocimientos que necesitan para reducir los mil inconvenientes que a diario les ocurren cuando prestan ayuda al arquitecto.

Como ejemplo de lo que decimos, citaremos el siguiente extracto de un artículo de un popular semanario de Nueva York que se refiere a un desgraciado accidente ocurrido en esta ciudad:

Debe suponerse que el arquitecto que dirigió los planos del edificio dejaría satisfecha a cualquier junta de expertos examinadores de arquitectos, así como que poseía los conocimientos necesarios y la aptitud para llevar su título, y encontrar así la pronta admisión en los colegios profesionales. Las pruebas presentadas ante el juzgado demuestran que el hundimiento se debió a la ausencia de conocimiento de los principios de la construcción más rudimentarios, que todo constructor y capataz debe conocer.

Esto demuestra la necesidad de avance técnico y práctico al preparar los albañiles y constructores sobre los que pesa una responsabilidad tan inmensa. Hace algunos meses uno de los arquitectos más populares y distinguidos de Boston escribió lo siguiente:

> En una de mis últimas visitas a Nueva York tuve ocasión de ver la gran carencia de trabajo esmerado entre nuestros operarios. Acaso la falta se debe más a la ausencia de una buena dirección y de instrucción técnica que a dificultades en la ejecución. Algunos albañiles trabajaban en la construcción de un muro de mampostería. Entre ellos había unos cuantos que eran sin duda de la Europa meridional y otros eran irlandeses o descendientes de éstos. El bien conocido principio mecánico de un muro de piedra consiste en colocar piedras transversales o perpiaños, teniendo cuidado al mismo tiempo de dejar el menor espacio posible para el mortero, rellenando los huecos con piedras pequeñas. En la parte de obra que estaba ya hecha y que seguía en curso de cumplirse, la aplicación de esta teoría podía observarse con facilidad, al menos en el punto en que trabajaban los extranjeros. Mas los albañiles americanos,

> aunque sin duda excelentes trabajadores, se afanaban en adosar unas piedras frente a otras y llenaban los grandes espacios con piedra pequeña y mortero. Quedaba patente así su ignorancia; esa manera de construir da por resultado dos medios muros unidos sólo por el mortero. Me costó un tiempo hacerles comprender su error y probarles que no es fácil obtener en muros construidos de piedra bruta solidez y belleza exterior al mismo tiempo.

Los inconvenientes referidos por el arquitecto de Boston parten del hecho de que el relativamente escaso número de albañiles americanos tiene más práctica en colocar ladrillos que en edificar muros de piedra. No obstante también es cierto que los mismos errores pueden advertirse cuando los albañiles de diferentes escuelas trabajan en conjunto. La mayor parte de los albañiles están habituados a considerar el muro dividido en dos partes: la exterior o frente, y la interior o espesor del muro. Esta idea se ha marcado en su mente por el empleo generalizado del ladrillo cara vista en el exterior, y de ladrillo ordinario para el interior.

En el cálculo teórico de estos muros no se acepta su espesor total, sino que su resistencia se calcula por el espesor del ladrillo común interior, sin considerar los 10 cm exteriores. Los obreros, sin embargo, al no tener ninguna idea de esta clasificación técnica y al estar acostumbrados a esta clase de trabajo, juzgan todo el muro de ladrillo como si fuese un chapado de ebanistería. Tan lejos se lleva este error que no menos de un ochenta por ciento de los muros de ladrillo construidos en Estados Unidos tiene un quince por ciento de juntas huecas entre los ladrillos interiores, de modo que la mayor parte de ellas no son muros cohesivos en absoluto, sino meras capas de ladrillos con las juntas exteriores muy bien rellenas y el interior vacío, como si sólo tuvieran que resistir cargas verticales.[2]

Otro inconveniente en la construcción de fábrica, al cual se concede muy poca importancia, es la preparación de los materiales para los morteros, en especial cuando se mezclan con otros elementos. Todo arquitecto conoce la importancia de esto, pero en la práctica hay muy pocos edificios en los que los obreros aplican los principios que la ciencia recomienda para ello, ni tampoco conocen las prácticas rudimentarias más indispensables. Por ejemplo, hace pocos días, el contratista de un edificio público muy importante que se está levantando en una gran

ciudad al norte del Estado de Nueva York, decía a uno de los miembros de la Junta de Obras: «Si por la demora o atraso en la cerámica o el hierro estamos obligados a trabajar en invierno, nos veremos forzados a mezclar alguna cal en el mortero de cemento que nos permita colocar los ladrillos en tiempo frío». Es casi imposible concebir que personas responsables recomienden de este modo y acepten semejante remedio. Sin embargo, es un hecho que la mayoría de los arquitectos americanos —donde hiela durante tres o cuatro meses al año— miren esa práctica con indiferencia y que sólo unos cuantos entre ellos se den cuenta de lo absurdo de la misma.

Creemos que ciertos arquitectos profesionales aceptan de buena fe tales recomendaciones, persuadidos en su ignorancia de que los constructores sólo desean que les sea posible trabajar en invierno, y obtener muros sólidos libres de los daños de las heladas. Desgraciadamente esto es lo mismo que si un sirviente intentara limpiar de hielo la acera con agua caliente en los momentos que hiela.

Un error en un asunto de negocios no tiene consecuencias irreparables ni interés público, pero en la construcción, donde pueden sobrevenir resultados fatales, es un acto criminal dejar a cargo de hombres ignorantes trabajos que requieran conocimientos especiales además de la capacidad y la conciencia de los deberes profesionales que hay que cumplir.

Con todo, los ejemplos dados más arriba son solamente una selección de un número infinito de los mismos, que han ocurrido no sólo en albañilería sino también en construcciones de hierro, aunque en este último caso, bien porque la obra de hierro es menos complicada, o porque, al hacerse en un taller, es más fácil contar con una mejor organización y unos operarios más aptos, se observan los principios técnicos mejor que en la construcción de fábrica, en la que necesitan verificarse al aire libre.

* * *

Sin embargo hay otras dificultades en la carrera de los arquitectos jóvenes. El estudio de la arquitectura clásica, lo mismo que las obras de Choisy y otras con el mismo carácter, aunque dignas de examen y meditación, no pueden bastar. No llenan los vacíos en la arquitectura actual, que críticos como Viollet-le-Duc in-

tentaron llenar para inquietud de los arquitectos de la generación pasada y confusión de los críticos modernos.

Desde la aparición en Francia de *El arte de construir en Roma* hemos estado esperando con interés publicaciones semejantes que se basen en la crítica comparada y analicen los antiguos sistemas de construcción similares a los nuestros. Confiamos en que de estos estudios pueda resultar algo de importancia histórica, que se difunda alguna luz, que se divulgue alguna nueva filosofía, nuevos puntos de vista sobre la Naturaleza, que puedan poner término a las controversias de escuelas opuestas.

Han burlado nuestras esperanzas. Quizás todos los esfuerzos fueron prematuros hasta hoy, cuando la tentativa de construir esos edificios gigantescos, esos nidos humanos aéreos, a unas alturas aventuradas sólo anteriormente por las águilas, han dado nuevos ímpetus a las formas y a los elementos de la construcción para el siglo XX.

Puede verse que la armonía entre la composición arquitectónica y la sólida y noble construcción de algunos de los monumentos descritos por Choisy, ya de ladrillo, piedra u hormigón y su imitación —con los novísimos elementos ofrecidos hoy a nuestra actividad— puede culminar en dos cosas. O bien la proporción de estos monumentos o de aquellas de sus partes que son dignas de perpetuarse debe recibir cambios tan esenciales como los que recibió de manos de los góticos, a fin de adoptarlos a las nuevas condiciones de la construcción de fábrica, o bien la composición arquitectónica se representará de manera falsa y no en armonía en las exigencias legítimas del arte de la construcción. Sólo se puede encontrar la belleza en la esfera de lo ideal, pues en la realidad física tiene que descender al terreno científico y experimental para darnos hoy de este modo nuevos elementos de construcción tan noble y tan lógica como la de los tiempos pasados y eliminar las formas de civilización anticuada que ahora nos ocupamos en parodiar. Necesitamos encontrar una nueva representación, nuevas formas que se ajusten a las necesidades actuales del arte.

Los góticos supieron vencer con habilidad sus dificultades, pero desconocieron por completo las que hoy se nos presentan. Las revoluciones por las que ha pasado la construcción durante los dos mil años que han transcurrido desde que se levantaron los monumentos descritos por Choisy con tan magistral competen-

cia, y los materiales y prácticas en uso durante la era cristiana, sólo pueden compararse con las revoluciones religiosas, políticas y sociales que forman la historia de la civilización. Aleccionados por años de estudio, los constructores góticos lograron armonizar la construcción de fábrica con el sistema que lleva su nombre, por la necesidad de reducir el peso de material, y el trabajo manual que los romanos tenían a su disposición por el empleo de esclavos. En efecto, dado que las clases trabajadoras eran libres y se habían constituido en gremios y ayuntamientos, se vieron obligados a reducir, como se ha dicho, el volumen de material con relación al espacio cubierto, así como el número de brazos necesarios para llevar a cabo la obra. De este modo, desde la casa de vivienda hasta la catedral, se generó una arquitectura típica de la Edad Media; si bien debemos hacer notar que para que el sistema gótico se desarrollase por completo se necesitaron trece siglos.

Cabría preguntarse si los arquitectos fueron tan afortunados a partir del siglo XIV. Su relativa ignorancia, la caída de las comunidades y las ciudades libres y el despotismo de las grandes agregaciones políticas no podían sino ejercer un efecto pernicioso sobre la arquitectura. El ejemplo surge en el Papado y lo diseminaron los jesuitas hasta descender hasta el remedo de los momentos de la antigua Roma, mientras el arte mismo se redujo después a la copia servil de los modelos que se consideran clásicos debido a los grandes genios que los produjeron pero sin gran estimación de sus méritos artísticos. El mundo se llenó después de construcciones inspiradas en San Pedro de Roma y en la catedral de San Pablo de Londres, dos obras que han causado tanto daño al arte como Alejandro Magno y Napoleón causaron a la humanidad, pero sin la reacción saludable que estos héroes produjeron con su meteórica carrera. Esta idea puede acaso mirarse como dudosa si se tiene en cuenta el convencionalismo inveterado de admirar esos edificios como modelos de belleza arquitectónica. Mas lo cierto es que el primero de los edificios citados inició y el segundo precipitó la decadencia a la cual es difícil escapar por efecto de la influencia ejercida por el arte francés, frívolo y superficial.

Los descubrimientos arqueológicos de 1842 en Asiria, Grecia, Pompeya y Herculano introdujeron una sobria y correcta arquitectura privada en Alemania e Inglaterra, arquitectura que desde 1850 hasta 1870 se conoció con el nombre de

neo-griega, pero desgraciadamente a su paso por Francia cayó en el descrédito por la mala concepción que se le dio.

Así llegamos a la arquitectura americana que, cuatro siglos después del fin de la Edad Media, y sin que importe cómo nació —de forma anómala— se extiende rápidamente en la forma de un noble sistema general de construcción, en el que se emplean los tres materiales modernos para edificar: cemento Portland, arcilla cocida y el hierro. Estos materiales se han combinado en tan novísimas concepciones de fabricación que cada uno es complementario de los dos restantes. De esta manera se realizan los ideales de la época de acuerdo con la ciencia y la experiencia, hasta tal extremo que los arquitectos del tiempo de Fidias podrían tratar de armonizarla felizmente con la filosofía de su época, por más que todavía estemos lejos de alcanzar la perfección. Esto se debe más a lo convencional de la ingeniería, a los intereses que se refieren al hierro, al miedo y a la carencia de convicciones. El tiempo, ayudado por la experiencia, lo hará desaparecer.

Estamos, por consiguiente, en posición semejante a la que se encontraban los romanos del tiempo de Augusto. Hemos cambiado la forma y manera de construir que tenían los griegos, exactamente como lo hicieron los romanos, aunque hemos conservado las formas del estilo griego como elementos decorativos. Además las formas monumentales del estilo romano, construidas, no según los cánones del espíritu clásico, sino en una falsa edificación de hierro, indigna y mercantil, que es lo que la estética condena con la severidad más inexorable.

¿No hemos adelantado, pues, lo bastante en la parte constructiva de las obras y sobrepujado a los romanos en el dominio de la belleza? Viollet-le-Duc, P. Mila, Sturgis y Marshall, lo aseguraban en términos diferentes, si bien expresaban unas ideas semejantes:

> La arquitectura de los romanos es una fábrica revestida con decoraciones, que son, en efecto, belleza arquitectónica hecha visible. Si consideramos aparte un monumento romano, tenemos que cumplir dos operaciones: debemos primero tener en cuenta los medios empleados en la construcción del verdadero edificio, y después deberemos probar la manera de darle forma y proporción tan adecuada y tan bella como sea posible.

Viollet-le-Duc declara que este sistema ofrece algunas ventajas, pero es con frecuencia una falsedad cumplida. ¿Por qué una falsedad? ¿Son falsedades las bien proporcionadas masas constructivas descritas por Choisy? No, esas masas son edificios: son la verdadera construcción, la verdadera arquitectura. La falsedad está en el ropaje arquitectónico de algunas de esas estructuras, al igual que los trajes, al no estar en correspondencia con los cuerpos, según la filosofía griega, son parodias en vez de realidades.

Los arquitectos actuales, lo mismo que sus discípulos, saben perfectamente todo esto, pero ¿por qué ideas pueden guiarse los neófitos? La obra de Choisy se ha traducido al inglés, y actualmente se anuncia una versión del *Diccionario*, en el cual bajo término «Construcción», Viollet-le-Duc aprovecha la ocasión, para hacer la crítica de lo que ha sido durante medio siglo el fundamento de todos los profesores de Estética.[3]

Es bueno condenar lo que se considera malo y alejarse de los errores; pero la caridad más elemental manda que ofrezcamos alguna luz, algún ideal, a las aspiraciones de los jóvenes. ¿Qué podemos dar a cambio de los errores condenados por la crítica? La respuesta es un tanto difícil, debido al fracaso de los *Entretiens*[4] y otras obras de diferentes autores que han atacado el error, pero que en vez de volver al punto de partida y tomar impulso nuevo, podría afirmarse que han comenzado con el arte medieval, renacentista, romano o bizantino.

¿Por qué no ir a la fuente principal? Asegurémonos primero de lo que necesitamos y entonces se procederá en nuestras construcciones según hacían los griegos, los padres de la filosofía —y en particular del arte. La delicada percepción artística de los griegos no se basaba tanto en el sistema heredado de sus antecesores, de los egipcios a los etruscos pasando por Asiria, cuando el empleo sencillo y natural de los materiales, al que llegaron tras siglos de experiencia. Sus procedimientos, lo mismo que los de sus antecesores, fueron los del minero y del cantero. Escudriñaban el interior de la materia inerte, con el mismo afán con el que busca el oro, hasta que encontraban, a fuerza de pesquisas y trabajos, en un trozo de mármol o granito una columna, un capitel o una cornisa, que satisfacían su gusto con exactitud. El procedimiento de los griegos consistía en hallar masas sólidas de forma natural, que estuviesen en armonía con su ideal en cuanto al papel de la construcción de madera, pero con la piedra como material. Este ideal es

simple y, sin embargo, dual; consiste en dar soporte vertical a un elemento horizontal.

Los romanos no procedieron de la misma manera. Comprendieron, al igual que nosotros, el sistema griego que consistía en ocupar un inmenso espacio con una construcción maciza proporcional a la superficie cubierta. Pero como los romanos exigían una superficie cubierta relativamente más grande que la que podían obtener entre columnas y muros, colocados a distancias cortas según el sistema griego, procedieron sobre un plan diferente. Las grandes masas de sus bóvedas, pilares y estribos, por su gran luz, tenían que construirse necesariamente con materiales de pequeñas dimensiones. Así crearon un nuevo procedimiento de construcción diferente del de los griegos, al cual podemos muy bien llamar orgánico o cohesivo, puesto que no es el seguido por el minero o el cantero, sino que es semejante al de la Naturaleza en la formación de los cuerpos que poseen vida latente. Esta diferencia fue la causa de la decadencia de la arquitectura griega desde el fin de la Roma consular, atravesando todas las civilizaciones hasta la época actual.

Ninguno puede sorprenderse por estas luchas, si se toma en cuenta la diferencia entre los procedimientos y los principios de cada escuela de construcción, porque la verdadera construcción es el efecto tangible, el lenguaje del pensamiento arquitectónico. Los griegos conocieron que podían encontrar las formas de sus ideas constructivas dentro del bloque de mármol o de piedra. Para ello sólo tenían que eliminar la capa exterior que cubre a aquellos materiales y que la Naturaleza ha ido formando en el curso del tiempo.

El procedimiento de los romanos, que es el nuestro propio y que creemos haber mejorado, es opuesto al sistema griego. Surgió de casi nada, de la materia infinitesimal y elaborada según lo verifica la Naturaleza. ¿Es el último procedimiento el más racional? Esta construcción orgánica se puede criticar desde el punto de vista filosófico por lo que toca a lo exterior, como fueron criticados los edificios griegos por sus miembros independientes tomados por separado y que procedían de diversas masas inertes para representar una construcción de madera.

Viollet-le-Duc y todos los autores alemanes y críticos contemporáneos denuncian como falsos e inverosímiles los revestimientos artísticos de algunos célebres edificios romanos y de todos los de la arquitectura contemporánea derivados de aquéllos. ¿Pero qué hubiera sido si, en vez de esta capa, adoptada de las formas

griegas de construcción, los romanos hubiesen cubierto los monumentos que ha descrito Choisy con un acabado de la misma clase que la construcción interna, del mismo modo que la Naturaleza usa la epidermis o la piel para preservar nuestra constitución interior? Pero sólo la Naturaleza puede dar perfectos ejemplos de armonía individual, parecería inverosímil a los ojos de la crítica si los muros de sustentación y los muros de contrarresto, construidos de ladrillo en vez de decorarse con pedestales y columnas de mármol semi-incrustado, se construyesen en el exterior con ladrillo visto de armoniosos colores, según ya lo habían hecho los asirios y más tarde los arquitectos hispano-musulmanes y orientales.

Por otra parte, podrían criticarse estas inmensas estructuras de ladrillo y hormigón que tanto ha realzado Choisy, si se hubiesen recubierto con un enlucido hidráulico, tal como lo emplea la Naturaleza en la decoración de sus objetos, como por ejemplo el admirable arabesco que forma la malla de la piel humana. ¿Y si hubiesen aumentado la belleza de aquellos recurriendo a esas armonías de colores que los musulmanes concebían y realizaban con tanto arte, y a consecuencia de lo cual sus trabajos se conceptúan como obras clásicas?

Pero los romanos, sin embargo, no podían proceder en ninguno de estos sentidos, por circunstancias que han pasado inadvertidas, y que creemos que son ignoradas de la mayor parte de sus críticos. Estaban bien familiarizados con la construcción griega. Cuando más tarde inventaron y propagaron su estilo nacional, tan opuesto al de sus antecesores, se vieron obligados a emplear algunas líneas constructivas exteriores con el objeto de explicar hasta cierto límite la masa orgánica, la musculatura carnosa, sin esqueleto, como perteneciente a seres incompletos o no bien desarrollados. Cubrían esas masas con una envoltura artística sin reparar en lo exótico de ésta, porque sus masas de material no tenían explicación por sí mismas. No ocurre así en nuestra construcción orgánica moderna por el uso de armadura interna o esqueleto de hierro. Esta armadura es necesaria a la fisonomía de la construcción cohesiva u orgánica, y filosóficamente puede muy bien compararse al sistema óseo natural. Su desarrollo y gradual aplicación son obra legítima del siglo que fenece y es exclusivamente americana. Por consiguiente, no es extraño que los romanos y los creadores del Renacimiento no hubieran podido hallar la solución del problema pues carecían de estos nuevos elementos.

En este punto debemos hacer notar que, además, era inútil para el arquitecto romano tratar de dar gracia y belleza arquitectónicas a las masas auxiliares de su construcción. No podía llegar a la concepción de la elegancia del arte griego por la sencilla razón de que dichas masas eran meros auxiliares de construcción para el arquitecto romano, el embrión de la armadura que empleamos actualmente. Si ahora, después de los siglos transcurridos, el problema aparece invertido para Viollet-le-Duc y otros a causa de que la construcción auxiliar ha prevalecido y soportado el peso de los siglos mucho mejor que el revestimiento decorativo, no ha de seguirse que los romanos pensaban y obraban conforme a una interpretación que jamás soñaron y que podría darse a sus creaciones después de dos mil años de existencia.

Por lo tanto, si el exterior exótico, mal ensamblado y tan severamente criticado, pudo tener más o menos un motivo de existir en alguna civilización pasada, hoy no puede haber excusa para él, porque no sólo disponemos de elementos más completos con los que realizar de manera noble la construcción cohesiva romana o construcción orgánica —que es también nuestro particular procedimiento de construcción— sino que también tenemos, exterior e interiormente, en dichos elementos los medios de aplicar la filosofía griega en su sabia sencillez. Esa filosofía evoca la belleza de las formas y los procedimientos naturales en cada periodo histórico. Somos, pues, tan lógicos en nuestra construcción como lo fueron los griegos.

Todo esto constituye una prueba sorprendente pero natural de la armonía que existe en el ideal del hombre cuando, sin vacilaciones ni perjuicios, nos decidimos sinceramente a meditar en el libro por excelencia, libro infalible e imperecedero, que la humanidad puede y debe adoptar como guía en su peregrinación sobre la tierra.

Sin embargo, aún queda la duda en lo relativo a la filosofía de la arquitectura exterior. La literatura griega, como todos sabemos, se inspiró en la sabia Naturaleza. Sus fábulas, comedias, dramas y tragedias respiran el verdadero espíritu de esa gran soberana. Las obras de Esquilo y Sófocles siguen el mismo culto. Los arquitectos griegos, aspirando la misma atmósfera, comprendieron, como los poetas, lo elevado de su misión. Los libros y las pinturas defectuosas no existían para ellos. Sabían que el arte original y absoluto tiene por modelo la Naturaleza y no

reconoce otro ideal que perseguir que la expresión tangible y plástica de sus concepciones.

Desde las civilizaciones etrusca y egipcia —orígenes de la construcción griega— hasta la época de Pericles en que alcanzó su mayor esplendor, ¿cuántas formas de capiteles, columnas, bases y molduras se usaron en Egipto, Asiria e incluso en la misma Grecia? Acaso tantas como hemos usado nosotros desde el Renacimiento hasta la fecha. A pesar de todo, los arquitectos contemporáneos de Kilikrates fueron bastante sagaces para dirigirse a la fuente, no a los etruscos, egipcios o asirios, sino a la Naturaleza misma, y evocarla en los capiteles, cornisas y columnas del Partenón. Fue en aquel periodo de la historia del pueblo griego cuando, después de haber pasado más de dieciocho siglos en el estado fisiológico de la sociedad griega, los cultivadores de las artes plásticas tanto como los de las literarias, se dedicaron con entusiasmo al estudio de la Naturaleza, sacando el arte intelectual del seno de esta madre inagotable de todas las cosas.

¿Por qué no seguimos nosotros la misma senda? ¿Por qué no mirar hacia los griegos y romanos, como los griegos miraron hacia los etruscos, asirios y egipcios? ¿Hay alguna razón para tomar el punto de partida en la época romana o en la Edad Media en vez de en tiempo de los griegos o de los egipcios? Si un aprendiz o ayudante del arquitecto, al medir una fachada, lo hace empezando en cada pilar y en cada hueco en vez de medir siempre desde el principio acabará obteniendo un error acumulado si cometiese un error intermedio. Por lo tanto, la medición del conjunto saldría mal.

¿Por qué no comenzar por el principio, la Naturaleza misma? Otras artes lo han hecho así durante largo tiempo. Todos nosotros recordamos que de jóvenes aprendíamos dibujo de figura, de grabados u otros dibujos cada vez más convencionales. Ahora todo ha cambiado. Ya no se copian grabados sino modelos tomados de la Naturaleza. Y más aún: si cualquiera interrogase a Kolbach, Meissonier, Madrazo, Courbet, o a cualquier otro genio de esa época acerca del mejor camino para iniciarse en el dibujo figurativo no podríamos esperar que la respuesta fuese: «empezad por copiar grabados y otras pinturas del museo». La respuesta sería: «copiad primero modelos del natural, después buscad recursos para vuestras futuras composiciones en los asuntos que la Naturaleza ofrece en abundancia a todos los que saben ver en ella e interpretarla». Y sobre todo, para saber ver

esos asuntos, el artista estudiante debe estar a la altura de su época, adquirir educación física, intelectual y moral, y por encima de todo esto, observar y analizar continuamente.

Esta respuesta viene también como anillo al dedo a los estudiantes de arquitectura. Deben dirigirse a la Naturaleza en vez de hacerlo a los defectuosos grabados y a las ideas contradictorias de las diversas épocas. Alguno tal vez preguntará cómo es posible ver o leer en la Naturaleza. (No existe en la Naturaleza ningún tratado sobre la filosofía del Arte! (La Naturaleza no nos da capiteles, molduras u ornamentos y estilos que correspondan a cada tiempo! Hemos estado acostumbrados a encontrarlo todo hecho en los libros, ilustraciones y dibujos que desvían y entorpecen lo mismo en artes plásticas que en literatura. Hemos perdido el hábito de leer los secretos del gran libro de la Naturaleza, el único donde podemos encontrar la verdad entera. Y ahora tenemos que comenzar igual que un niño aprende a leer, y asimilar lo que es útil y conveniente en toda ciencia y arte.

Esto no fue necesario en la edad de oro de la arquitectura griega, porque entonces los artistas estaban psicológicamente dispuestos al criterio humano. Dio como resultado el Partenón y los Propileos, sin importar el número de capiteles, molduras y columnas ensayadas en tiempos pasados.

El problema sería entonces calcular y ajustar la función física, mecánica y filosófica de cada material y aplicarlas en conformidad con la estructura para darles formas filosóficas externa e interiormente, en armonía con las necesidades y el carácter del edificio.

Si esto es verdad, no es una tarea difícil. Sólo requiere el ejercicio de las facultades críticas que no son sin duda inferiores a las de inventiva. Todos estarán conformes en admitir que es mucho más fácil para un arquitecto joven empezar por ejercitar las facultades críticas en vez de las que son necesarias para una actividad creadora prematura, si no inculta. Ésta podría desarrollarse bien si el estudiante de arquitectura, modesto como debe ser, está dispuesto a prestar un poco más de atención a las artes prácticas, según acostumbran a hacer sus antecesores. Así conocerá las partes débiles y fuertes de los materiales que ha de usar, y las dificultades de la construcción, de suerte que pueda poner en acción su propio juicio, imprima el sello personal a sus concepciones y sea, por último, original en todas las circunstancias.

Para desarrollar estas facultades creemos que las escuelas de arquitectura debieran tener un departamento esmeradamente dotado en el que los mecánicos o ejecutantes en la construcción de edificios y artes aplicadas pudieran enseñar, en especial a los albañiles, algo más que la práctica rudimentaria de su oficio. Así se les ofrece una oportunidad para que disciernan y separen lo bueno de lo malo, de modo que al encontrarse frente a sus materiales sepan lo que tienen que hacer y cuáles son sus responsabilidades.

Podrían ofrecerse premios como medio de estimular a los estudiantes de cada sección. En la sección de albañilería, por ejemplo, se premiarían los modelos más económicos y resistentes de la fábrica exterior, y también se ofrecería recompensa por las particiones o tabiques de fábrica que fuesen menos costosas y de mejores condiciones. Y aún se ofrecerían igualmente a los forjados, cielos-rasos, techos y escaleras de fábrica que fuesen también más económicos, prácticos y resistentes. Es evidente que las escuelas de arquitectura debieran fomentar estos trabajos, a fin de dar unidad a la acción de los futuros arquitectos, directores de obra, maestros constructores, capataces y operarios. Desde luego los profesores no tienen necesidad de efectuar ningún trabajo manual, sino sólo dirigir y dar ejemplo a los estudiantes de arquitectura y a los de artes aplicadas y oficios, a la par que impartir conferencias y demostraciones. Se encargarían así mismo de distribuir premios anuales y las ayudas que las corporaciones, los empresarios o las entidades municipales puedan ofrecer para beneficio de la comunidad, del mismo modo que se dan premios en la actualidad para viajes de estudios.

Lo que los maestros constructores tienen en común con las clases trabajadoras es trabajo y provecho, dejando la gloria y el público reconocimiento a los arquitectos. No obstante estamos convencidos de que todos los verdaderos constructores y obreros se sienten orgullosos de su profesión. Saben el papel que tienen que desempeñar y la necesidad de unir su acción para el progreso de las clases trabajadoras mediante la educación técnica necesaria. Dado que son los encargados y responsables de la ejecución del plano del arquitecto, se sentirían auxiliados y protegidos física y mentalmente por el conocimiento práctico que reciben de la dirección de obra. Todos los que así no procediesen debieran ser expulsados de las oficinas de los arquitectos, aunque no fuese más que como medida de autoprotección.

Las escuelas no son centros dictatoriales; su propósito es la instrucción. Los maestros contratistas están organizados en todas partes, y los obreros en las obras de construcción están igualmente organizados en cualquier lugar. ¿Por qué no ha de poder extender su organización hacia el progreso tanto moral como financiero de la profesión? Acaso se piense que el progreso intelectual de las clases trabajadoras convertirá en más pretenciosos a los maestros constructores, al darles menos probabilidad de oponer manos hábiles en casos que requieren conocimientos especiales.

Esto podría ser cierto si los maestros constructores se viesen obligados a utilizar esta clase de obreros; por otra parte, también se podrían ver inconvenientes en la enseñanza popular en la escuela de práctica técnica. Pero nada de esto es necesario. Cuando un propietario necesita construir no está obligado a contratar un arquitecto titulado. Es libre de emplear a la primera persona que pase por su puerta. Pero, como existe un gran número de arquitectos profesionales donde elegir, confiará su obra a un individuo capacitado en lugar de ponerla en manos de uno que carezca de experiencia.

Lo que antecede también puede aplicarse cuando tengamos obreros que hayan pasado por la escuela técnica especial de construcción, que será sin duda el caso si la senda quedase libre para el progreso. Con trabajadores dignos de confianza podrá obtenerse trabajo de buena calidad. El arquitecto estará en situación de demostrar ventajosamente su genio y sus conocimientos porque se sabe bien que en todas las artes donde el ejecutor no es autor los fracasos se deben a los medios empleados y a los trabajadores, que son dichos medios.

En corroboración de lo que acabamos de decir recordaremos la siguiente anécdota, rogando al lector se sirva dispensarnos si la encuentra más aplicable a la música que a la arquitectura. Sin embargo, como las artes nobles no se diferencian entre sí sino en su expresión física, creemos que la disculpa no necesita ser muy grande. En uno de los grandes conciertos de invierno del Teatro Imperial de San Petersburgo informaron al director J. Goula, poco antes de comenzar, de que el timbalista se encontraba enfermo y no podía venir a su puesto. Ahora bien, este instrumento, aunque parece tan fácil que un muchacho podría tocarlo, es de la importancia capital en una orquesta. Algunos de los músicos se brindaron para sustituir al timbal, pero el director sabía a qué atenerse y ordenó en seguida que

se fijase un aviso expresando que, por enfermedad del percusionista, el director asistente dirigiría el concierto. El público al principio no podía comprender que la enfermedad del timbal fuese causa para que el primer director delegase su puesto en el segundo. Sin embargo, cuando se interpretó la primera obra del programa, que era la célebre *Marcha de las antorchas* de Meyerbeer todos vieron con gran sorpresa que el maestro Goula se hallaba al pie de los timbales tocando con toda la habilidad de un consumado percusionista. Cuando el auditorio se dio cuenta de ello, el famoso director recibió en tan humilde puesto la ovación más grande de toda su vida.

Sin embargo un arquitecto no puede recibir una ovación si, por enfermedad de su maestro de obras, se viese obligado a tomar parte en el cumplimiento de cualquier trabajo importante de un edificio que se construye bajo su dirección, tal como el relleno de los cimientos, que es siempre peligroso por abandono y que no puede vigilarse con cuidado, o también el modelado de una figura decorativa a la que trata de darle líneas constructivas con sus propias manos. En vez de una ovación, probablemente se viese salpicado de mortero o embadurnado de barro de modelar, pero su satisfacción interna le pagaría con creces la falta de los aplausos del público; y el regocijo de su conciencia por haber sido fiel a su profesión le proporcionaría el apacible sueño del justo cuando, cumplida su labor, se retirase al santuario de su hogar.

# 2

# Función de la fábrica en la construcción moderna

Desde que en 1896 publicamos nuestro primer libro acerca de la Función de la Fábrica en la Construcción Moderna con el título de *Prolegómenos* han transcurrido para el hombre varios años de esfuerzo en su noble aspiración de agotar la experiencia, favorable o adversa, en cada una de las ramas de la actividad humana, siguiendo la ley, en apariencia infalible, de eliminar o pasar sobre todos los obstáculos que puedan presentarse en la senda del progreso.En el arte de la construcción, la más noble y privilegiada de las creaciones del hombre, tanto la experiencia como la actividad creadora por desgracia se han acompañado de amargas lecciones. No sólo son casos desastrosos de incendios sino verdaderas conflagraciones; y no sólo se trata de derrumbes parciales de construcción, sino de espantosa y total destrucción. Estos desastres han dado lugar a discusiones técnicas y de procedimiento, que recuerdan episodios de la historia de la construcción en ciertas épocas de la Roma antigua.

Estos resultados, fatales en gran número de casos en la construcción urbana, son los que, en ocasiones, han obligado a formular prácticas y establecer ordenanzas urbanas, con el objeto de evitar y prevenir el abuso de la naturaleza de los materiales. En muchos casos ha influido en el modo de ser de la arquitectura de la época actual. Esto se ha discutido en las sesiones 4 y 7 del Sexto Congreso de Arquitectos,[5] que se celebra en Madrid en los momentos en que escribimos estas

páginas. Su intención es averiguar los medios para evitar el conflicto constante entre la necesidad de leyes para la construcción y los intereses de la arquitectura. Este conflicto, a nuestro modo de ver, no debiera existir.

Bien es cierto que algunos materiales y aplicaciones son nuevos. Sin embargo, la falta de una clasificación apropiada de las cualidades de los mismos y el conocimiento técnico directo son, en gran parte, la razón del caos y el conflicto, así como de los puntos de vista discordantes excepto en aquellas obras donde el arquitecto es una personalidad excepcionalmente capaz y superior (de las cuales hay pocas) que impone su autoridad con el fin de que triunfe el buen sentido para gloria del arte, sin menoscabo de las exigencias de la higiene y de la estática.

La influencia del obrero moderno no es ahora de menor importancia en el modo de ser de la arquitectura que en la época romana y en la Edad Media, por la doble razón de su aptitud como obrero especializado o simple peón y su relativa posición política. Por este motivo, en n1 6 del programa del citado Sexto Congreso Internacional se ha puesto a discusión el tema que desarrollamos en nuestros *Prolegómenos*, y cuya solución esperamos no diferirá de lo que ya expresamos en él. Aunque este trabajo, materialmente considerado, es de pura aplicación, pensamos (como en el caso de los *Prolegómenos*) que todas las aplicaciones prácticas y todo el material técnico dedicados a los estudiantes de Arquitectura, no sólo no deben en ningún caso enfrentarse con la estética, sino que también deben considerarse expresamente desde ambos puntos de vista; esto es, desde el punto de vista de la aplicación mecánica y material, y desde el punto de vista que reside en la teoría del arte. Los materiales de construcción, en sus distintas aplicaciones, son el único medio de expresión de que dispone la arquitectura.

Repetimos en este segundo libro lo que creíamos en el primero. No escribimos creyendo ofrecer algo nuevo a los grandes maestros, con gran experiencia, que tienen su puesto legítimo en el templo de la arquitectura. Sus vastos conocimientos y la observación diaria que han acumulado les relevan de tener poco o nada que aprender en esta obra. Sin embargo, hay muchos, que sin ser arquitectos, influyen en el modo de obrar de los profesionales, a quienes se coarta la libertad de acción y concepción con leyes e impedimentos, no sólo contraproducentes sino por completo erróneas, que desvían o vician los principios fundamentales de construcción y otros principalmente basados en la naturaleza.

No basta que las revistas técnicas los condenen en vano constantemente, puesto que les prestan muy poca atención. Sólo cuando ocurren catástrofes como las recientes se hacen patentes estos errores que están presentes en la mente de todos los que nos dedicamos al vastísimo ramo de la construcción.[6]

Así, en la presente obra, continuación de la precedente, clasificaremos primero los materiales para la fábrica y sus funciones de acuerdo con sus condiciones especiales y su aplicación, teniendo en cuenta las reglas modernas para prevenir la lenta y la rápida oxidación de los materiales aplicables a la construcción en boga hoy en día. Esta clasificación pondrá de manifiesto otras nuevas prácticas erróneas que existen en la construcción, así como la influencia que ejercen en el modo de ser de la arquitectura en el momento histórico actual.

## Función de la fábrica

Entre las soberbias y nobles obras humanas ejecutadas por los habitantes de esta inmensa jaula que llamamos Tierra, las del arquitecto y del ingeniero son sin duda una de las que imitan más extraordinariamente el trabajo del Supremo Hacedor. Existen analogías de actividad comparativa por múltiples necesidades del orden material y moral que el arquitecto y el ingeniero están obligados a afrontar. Se hacen creadores en su entorno, no obstante las limitaciones de la Naturaleza, impulsados por sus obligaciones y responsabilidades hacia las leyes divinas del progreso y la perfección. Los monumentos conmemorativos, templos, palacios, bibliotecas, viviendas privadas, caminos, canales, construcciones sanitarias y demás obras tangibles del mismo orden son creaciones variadas y elocuentes que responden a las necesidades y conveniencias recomendadas por la conciencia crítica del arquitecto.

Si el Creador ha puesto a nuestra disposición la vida y la materia, el arquitecto y el ingeniero son entonces los encargados de estudiar e interpretar las condiciones naturales establecidas por la Suprema Sabiduría, y proveer a las necesidades para la progresiva perfección. El aire que respiramos, la luz, el agua, elementos todos esenciales e indispensables a la vida, se suministran en relativas proporciones por la naturaleza. Se deja su uso más o menos liberal a las posibilidades individuales. Para llegar a este fin, para crear conforme a estos problemas,

nos son necesarios los materiales de construcción. Son elementos indispensables y por esto, en toda obra tangible, el arquitecto está obligado a emplearlos. Por tanto, debe tener un conocimiento exacto de los mismos, condición indispensable para que las características especiales de cada material se apliquen según lo requiere su naturaleza.

## Materiales de construcción

Los materiales de construcción empleados desde las edades más remotas pueden reducirse a cuatro clases: tierra, piedra, madera y metal. Los dos primeros se han aplicado, y todavía se aplican, en su estado natural o modificados. No falta quien les estime materiales inferiores, mientras que el metal y la madera se consideran materiales superiores. Los dos primeros, tierra y piedra, se han clasificado además como materiales permanentes, en virtud de las propiedades químicas de los elementos que los componen que, combinados, forman compuestos de carácter permanente. El oxígeno, que forma parte de la atmósfera en su estado natural, no los ataca, puesto que ya entra en su composición. Por tanto, sólo pueden destruirse por métodos mecánicos o violentos. Pretenden una duración infinita y, seleccionados adecuadamente, tanto serán destruidos por el fuego. También se ha demostrado que la tierra y la piedra son materiales que no pueden trabajar a tracción debiendo emplearse sólo a compresión.

Por otra parte, contamos con el otro grupo de materiales, la madera y los metales, que se han llamado materiales superiores. Estos son de corta duración. La madera tiene en contra su composición orgánica. La simple exposición atmosférica la destruye en pocos años. Además, está sujeta a una oxigenación más rápida si le ataca el fuego. Los metales tardan algún tiempo en oxidarse, pero su durabilidad es también limitada. Exigen cuidados constantes para evitar que queden expuestos al aire. Por esto se puede ver que siempre están muy protegidos.

Por lo tanto, según estas condiciones, se pueden diferenciar dos grupos de materiales: los materiales de construcción de carácter permanente adaptados para trabajar a compresión y los materiales perecederos, pero al mismo tiempo los propiamente adaptados para trabajar a tracción. Los materiales del primer grupo tuvieron gran uso en civilizaciones pasadas, por ejemplo, en Antigüedad y la

Edad Media, cuando se construían los edificios con los que ahora se consideran materiales inferiores, principalmente la fábrica.

De estos grupos, los que más se usaron en los tiempos más remotos fueron la tierra y la madera por razón de la ligereza de su peso y su empleo fácil. En la actualidad se utilizan por la misma razón en la construcción de parapetos, alcantarillas, fortificaciones y en la edificación económica de casas, almacenes y otros edificios similares. Después de la tierra y la madera, es indudable que la fábrica fue la más usada. Hoy es el material que se adopta para la construcción de los edificios más importantes. La fábrica ha servido y sigue sirviendo para revelar la historia de las edades pasadas a las nuevas generaciones.

El empleo de los metales en la construcción de edificios es de aplicación moderna por el mayor coste y dificultad de su puesta en obra, en comparación con la madera. Además, sólo en la época moderna ha sido posible producir económicamente estos materiales en grandes cantidades. Entre éstos, el hierro es el más abundante. El hierro colado es más barato que el hierro forjado. Éste es más costoso, pero se adapta mejor a los fines de la construcción.

Sin embargo, la fábrica no se puede sustituir por el hierro, excepto en los casos en que la economía sea el objeto principal, debido a que la fábrica es el material más duradero que puede utilizar el hombre y el único admisible en edificios de carácter monumental, según se demostró siempre en las civilizaciones pasadas. Un examen detenido y un estudio cuidadoso de los efectos de los grandes incendios en las ruinas de los antiguos monumentos de la Edad Media y de los tiempos relativamente modernos ha probado que no toda fábrica posee la misma resistencia contra los elementos destructores a los que frecuentemente se exponen las construcciones. Esta investigación ha producido los siguientes resultados:

1. Los materiales denominados de carácter permanente, es decir, las fábricas propias para trabajar a compresión —el granito o el mármol—, cuando se exponen a la acción del fuego, pierden esta resistencia porque comienzan a degradarse. Por el contrario, hay otros como la fábrica de ladrillo que resiste más o es refractaria a la acción del fuego.
2. Los materiales conocidos como de carácter perecedero, los no oxigenados y propios para tracción, la madera y los metales, siempre pierden su condición

de resistir los esfuerzos de tracción en un incendio. Algunos de ellos, como por ejemplo la madera, se destruyen por completo bajo la acción del fuego.

3. En los edificios donde semejantes elementos perecederos se combinan con cualquier clase de fábrica, ya sea en forma de dinteles, vigas o armaduras, cuando se exponen a la acción del fuego pierden su resistencia. Si están, como sucede a menudo, empotrados en la fábrica para que funcionen como tirantes, provocan su destrucción y ruina.
4. No todas las clases de fábrica pierden sus propiedades cohesivas o se destruyen bajo la acción del fuego.

## La fábrica como material

La fábrica, tal como se ha definido en general hasta el presente, es una construcción completa de material, ni orgánico ni metálico sino de gran número de componentes, unidos de tal modo que forman una masa sólida. Por lo tanto, en esta definición se comprenden todas las construcciones de ladrillo de diferentes clases y fábrica de piedra, bajo todas las formas y condiciones, incluso los conglomerados de hormigón.[7] No forman parte de esta clasificación, otras construcciones de piedras sueltas que se mantienen en su posición por el mutuo rozamiento, como las que se encuentran en algunas alcantarillas; se considerará la tierra suelta.

Sólo hay cuatro grandes grupos en los que se puede subdividir la fábrica según el material del que se compone:

1. Ladrillo crudo o adobe; la más rudimentaria.
2. Ladrillo cocido; más resistente que muchas clases de piedra.
3. Piedra; en sus diferentes variedades y dimensiones.
4. Hormigón o piedra artificial (hormigón de piedra machacada o cascajo).

### *El adobe*

El adobe resiste el fuego, pero expuesto a su acción, sufre variaciones de dimensión diferentes en unos puntos de otros, en función de la intensidad del calor. Se producen así grietas más o menos peligrosas. Por esta razón no puede utilizarse en edificios expuestos a incendios, y mucho menos para techos o cubiertas.

*El ladrillo*

El empleo del ladrillo es antiquísimo. Si está compuesto con buena arcilla y esmeradamente cocido constituye la mejor clase de fábrica. El ladrillo común que se usa para construir se compone generalmente de arcilla plástica con algo de arena o silicato simple. Para los ladrillos de suelos y techos se debiera usar con preferencia la arcilla que más se acerca al puro silicato de alúmina, esto es, la arcilla refractaria. De esta manera serán más resistentes al fuego. Esta clase de arcilla es la que mejor se adapta a la construcción moderna.

La calidad de la arcilla y la temperatura a la cual se cuecen los ladrillos deberían estar en conformidad con el lugar en que se van a emplear. Por ejemplo, el ladrillo para la construcción no debiera cocerse hasta la vitrificación, puesto que el mortero no puede unirse en él. La vitrificación depende no sólo del grado de calor sino también de la composición de la arcilla. Diversas clases de arcilla existentes en el mercado pueden vitrificarse a muy baja temperatura (925 a 980ºC) en razón del material fundente contenido en la arcilla, que generalmente es óxido de hierro y álcalis. Se hace un ladrillo pesado que no soporta excesivo calor. El ladrillo cocido a menos de 1.100ºC y con una resistencia por debajo de 14 N/mm$^2$ no debiera admitirse en las construcciones modernas.

Con frecuencia puede verse en algunos edificios, después de un incendio, que los ladrillos ofrecen señales de fusión y que sus dimensiones se han reducido hasta el extremo de que se producen grietas en los muros. Tales ladrillos no debieran aceptarse hoy para edificios a prueba de incendios. Desde luego son resistentes pero, por las razones expresadas, no pueden resistir un fuego de más de 925ºC. Poco tiempo atrás, la condición de ladrillo duro y resistente era suficiente, mas hoy esa condición no basta. Se hace necesario que además de la dureza tenga resistencia al fuego; condición importantísima ésta última si se tiene en cuenta el papel de las fábricas de ladrillo en las construcciones actuales.

Las juntas tienen gran importancia en la fábrica de ladrillo. El mortero que se use debe tener la misma resistencia a compresión que el ladrillo. Si éste, después de cocido, tiene una resistencia máxima de 14 N/mm$^2$, el mortero deberá tener igual resistencia a los treinta días de su puesta en obra. Por consiguiente, una fábrica de ladrillo en la que todas las juntas están bien rellenadas, como la cons-

truida con ladrillo duro cocido a 1.100ºC, y donde la resistencia del ladrillo y del mortero no sea menor de 14 $N/mm^2$, será si no la mejor, la fábrica más perfecta que se pueda, humanamente, ejecutar.

*La piedra*

Aunque la fábrica de piedra es duradera y presenta notable belleza es, al mismo tiempo, y por muchas razones, inferior a la fábrica de ladrillo. Se pueden considerar las siguientes cinco clases de piedra como las más usadas en la construcción. El granito, que es la más difícil de trabajar, pero la más resistente al tiempo y por tanto la más conveniente para fábrica. Puede exponerse a la humedad o a la acción de las heladas. En este sentido es casi superior al mejor ladrillo bien cocido, pero muy mala para resistir al fuego. Al granito le sigue el basalto, que es tan duro como él; y a continuación, el mármol, la caliza y la arenisca.

*El hormigón*

El hormigón es una mezcla de piedra y mortero. También recibe el nombre de piedra artificial. Se compone de fragmentos de piedra ligados con mortero, el cual forma una capa que cubre cada pieza y llena todas las cavidades. El hormigón bien hecho debe contener cemento y arena que llene todos los espacios vacíos entre los fragmentos de piedra. Al mismo tiempo el cemento llena todos los espacios vacíos entre los granos de arena. Para conseguir una buena piedra artificial no es necesario que contenga pedazos de piedra machacada, basta con que tenga arena y cemento.

El hormigón de escorias —mezcla de cenizas y residuos sólidos de combustión, como el cemento Portland— no puede estimarse como material de construcción de carácter permanente, como la piedra artificial o los conglomerados de cemento con piedra o cascajo. Esto se debe a la presencia de agentes químicos, sobre todo ácido sulfúrico. La acción de este ácido sobre el cemento Portland hace aumentar el sulfato de cal, y le da, por consiguiente, carácter perecedero.[8]

El hormigón tiene una vasta aplicación. Goza de las mismas condiciones peculiares que la piedra; con la particularidad de que ofrece los mismos peligros inherentes a los materiales de fundición. No hay ninguna duda de que se puede hacer una buena fábrica con hormigón. También es posible obtener excelente piedra

artificial que posea el mismo efecto de durabilidad que la natural, pero nunca tendrá la preferencia para obra exterior sobre la piedra natural o el ladrillo. La imitación no puede llegar jamás a alcanzar idéntica belleza que tienen los materiales naturales nobles.

Por lo que hemos dicho, se sigue que actualmente se deben considerar tres grupos generales de fábrica efectivos en la construcción moderna.

1. Denominaremos como primer grupo la fábrica ignífuga hidráulica. Es la más resistente a los efectos de fuego intenso en edificios cubiertos y cerrados. Aunque no está vitrificada absorbe muy poca cantidad de agua y tiene una resistencia de, al menos, 14 N/mm$^2$ a compresión. Esta clase de fábrica la llamaremos también fábrica de primer orden. Para la fábrica de primer orden sólo tenemos ladrillos cocidos por encima de los 1.100ºC, y lo suficientemente duros para resistir los 14 N/mm$^2$.
2. La fábrica de segundo orden es la fábrica hidráulica, aunque no es precisamente ignífuga. Esta fábrica no está vitrificada y sólo absorbe pequeñas cantidades de agua. Es capaz de resistir no menos de 14 N/mm$^2$ a compresión. No es necesariamente refractaria al fuego. Para este segundo grupo de fábrica tenemos granito, mármol y otras piedras, y también ladrillo que, debido a la presencia de material fundible en su arcilla —generalmente óxido de hierro—, puede fabricarse duro y bien cocido a una temperatura algo más baja, entre 925 y 980ºC.
3. La fábrica ignífuga no hidráulica, o de tercer orden, presenta una alta resistencia al fuego, pero absorbe el agua con exceso. Por lo tanto, no resiste grandes cargas a compresión. Para el tercer orden tenemos solamente ladrillo refractario, con el máximo de condiciones ignífugas, pero que por ser relativamente refractario al fuego no puede llegar a cocerse perfectamente ni alcanzar un estado de buena cohesión. Como además es semiporoso absorbe gran cantidad de agua y es incapaz de resistir más de 3,45 N/mm$^2$ de compresión.

Lo anterior demuestra que para edificios que han de resistir el fuego no disponemos de otra fábrica que la de primer orden, es decir, fábrica de ladrillo adecuada para resistir el fuego y la compresión y que absorba la menor cantidad de agua

posible. Demuestra, así mismo, que la fábrica de piedra, o cualquier otra combinación en que la piedra forme parte, no es propia para edificios en los que todos los materiales deben ser a prueba de fuego. Por tanto, la fábrica de piedra, o cualquier componente de este material, debe usarse únicamente en los edificios que no corran riesgo de incendios.

## Aplicaciones propias de estas fábricas: resistencia al fuego en edificios con techo o cubierta

Cuando el objeto de una construcción sea delimitar o confinar un recinto cubierto pero su interior esté abierto, ningún fuego desarrollará un alto grado de calor. En este caso no es necesario que la fábrica de los muros sea de primer orden. Basta para tal propósito con la fábrica de segundo orden, mas en ningún caso deberá hacerse uso de la piedra.

Pero, si el edificio tiene cubierta o techo, el espacio deberá considerarse como cerrado, aunque no tanto como un horno. Esto es así aunque haya una abertura lateral o en el techo. Bajo estas circunstancias, en caso de incendios, los muros y techos están por lo general sujetos a un grado de calor muy superior al del caso precedente.

En este segundo caso, el calor es más directo en el techo y en las esquinas de las aberturas, por donde los gases calientes se escapan al exterior. Como en un espacio cerrado de esta clase se desarrolla un calor intenso por la combustión de los muebles y su contenido, los muros interiores y, en especial el techo, deberían ser de fábrica ignífuga hidráulica del primer orden. Si los muros no fuesen de fábrica de primer orden se produciría la destrucción y se derretiría la superficie del ladrillo, es decir, comienzo de fusión de la fábrica que no se ha elegido convenientemente para resistir al fuego. Si los techos no fuesen de fábrica de primer orden, no sólo sufrirán tanto como las paredes, sino que el material del techo, privado de apoyo vertical directo cederá —en caso de que no se trate de una construcción abovedada. Se quebrará o caerá tarde o temprano, según la naturaleza de los materiales de los que está construido.

Cuando el hierro, buen conductor, forma parte sustentante del techo y llega a exponerse al fuego, absorberá el calor, se ablandará y doblegará bajo su propio

peso, lo cual, agregado al peso de la fábrica que soportaba, echará por tierra a los muros en su caída. Este espectáculo puede presenciarse en cualquier incendio, con la circunstancia de que el peligro se aumenta allí donde las vigas se sostienen por pilares aislados, ya sean de hierro o de fábrica, que no poseen las condiciones necesarias para resistir el fuego. De lo que antecede podemos inferir las siguientes deducciones:

1. El hierro debe estar protegido lo mismo contra la lenta que contra la rápida oxigenación.[9]
2. El único material adecuado para esa protección es la fábrica del orden que hemos denominado ignífuga hidráulica.
3. Para proteger el hierro contra la lenta oxidación basta la fábrica del segundo rango, la fábrica hidráulica no ignífuga.
4. Los muros de los edificios con el carácter de permanente resistencia al fuego, lo mismo que los techos, deberán construirse de fábrica del primer rango.
5. La fábrica de piedra y sus componentes, así como el hormigón, puede ser útil para la construcción de cimientos y muros que no estén expuestos a incendios confinados y puedan proteger materiales perecederos, como el hierro, contra la oxigenación lenta. La piedra, o la piedra artificial, no se debería emplear para proteger el metal de la oxidación violenta, ni usarse para puentes, a menos que no tenga mucho espesor, o esté en gran proporción.

Es evidente que el material para forjados, cubiertas y techos no debe ser voluminoso y pesado aún donde la carga es móvil. Debe ser en todo caso de sección relativamente pequeña dentro de la resistencia requerida. Por esta razón el material debe ser tenaz y duro. Trabaja más o menos a flexión, y dado que la línea de empujes se aparta del perfil del arco cuando el peso cambia de posición. Si las condiciones son las más favorables, es decir, cuando la línea de empujes sigue el perfil del arco, trabajando absolutamente a compresión, se necesita una sección más reducida, con poco material.

Esta es la razón por la cual la forma mecánica más apropiada y económica de forjado, techo o cubierta es la bóveda, a no ser que se empleen materiales perece-

deros como los metales para colgar los pisos o techos. En este caso se depende de los elementos traccionados. Sin embargo, este sistema estará siempre sujeto al riesgo de la oxigenación lenta. Además, estará expuesto a la oxigenación rápida o al fuego, aunque se empleen, como se ha dicho, materiales de gran consistencia, con la previsión del alargamiento y acortamiento de los mismos cuando trabajan como construcción colgante. Tal es el motivo por el cual esta clase de construcción suspendida nunca se aceptará como de carácter permanente.

## Efectos de la dilatación térmica en la fábrica

En edificios que sean enteramente de fábrica, la dilatación o contracción no afecta visiblemente a ninguna parte de su estructura. No obstante, en la construcción moderna el hierro se emplea en conexión con la fábrica. Si la temperatura aumenta por la violencia de un incendio, como el metal es mejor conductor que la fábrica, la dilatación del primero es una causa de destrucción. En el reciente Congreso Internacional para la Prevención de Incendios, el presidente de una de las compañías de seguros más importantes aseguró, al hablar de las escaleras, que «los materiales sujetos a las leyes de dilatación y contracción que se exponen súbitamente al fuego no se deberían emplear en escaleras. Por tanto, se eliminan la piedra y el hormigón en su construcción». Puede decirse, en efecto, que no existe ningún material que reúna buenas condiciones de construcción que no esté más o menos comprendido dentro de las leyes de dilatación. Es evidente que el hierro cae bajo las mismas condiciones defectuosas que la piedra y el cemento cuando éstos no están protegidos.

En algunas construcciones incluso la diferencia en las temperaturas medias entre verano e invierno afecta también a la fábrica, a causa de la dilatación del hierro. Esto puede suceder por ejemplo en una construcción colgante, en la que el hierro o elemento traccionado pasa entre el comprimido, es decir, la fábrica de un forjado o de un piso. Como el hierro de forma catenaria es más largo que el forjado o piso horizontal de fábrica, el alargamiento por dilatación del hierro sobre la fábrica hará que ésta se desuna o afloje y se abran grietas. Así, la construcción queda expuesta al fuego. El resultado estará en proporción del incremento de la luz de la construcción colgada, ya sea techo o cubierta, entre vigas o entre

muros. Cuanto mayor sea la curva del hierro, menor será la tracción y el trabajo de éste. Sin embargo, el hierro se dilatará proporcionalmente más que el forjado colgado.

Por otra parte, se puede hacer el forjado directamente por medio de una construcción sólida a base de bóvedas tabicadas. En este caso, su dilatación, aún durante el fuego, provocará el ascenso de la clave en sólo un centímetro por cada tres metros lineales de arco con un diez por ciento de flecha, a la temperatura excepcionalmente intensa de 1.370ºC, y sin que afecte en modo alguno a la construcción. Esta prueba la verificó el Departamento de Construcciones de Nueva York para una bóveda de 14 pies (4,3 m) de luz y 3 pulgadas (7,6 cm) de espesor, dentro de una cámara cerrada en la que se alcanzó una temperatura de 1.370ºC.

La sección transversal del espesor de cualquier bóveda, construida con materiales modernos delgados y resistentes, ha de ser de momento reducido. El grueso varía del 1/50 al 1/100 de la luz o cuerda total del arco. La delgada y sólida fábrica de arcilla cocida dispuesta en arco es el único material irrecusable a causa de la mínima dilatación de esta clase de fábrica, principalmente porque la forma arqueada tiene la valiosa condición de que, al dilatarse, sólo eleva la clave de los arcos un centímetro por cada tres metros como se ha mencionado antes. A medida que se enfría vuelve a su condición normal sin afectar prácticamente en modo alguno su estabilidad. En algunas construcciones de esta clase, el espesor es de sólo 1/150 a 1/200 del vano total.[10] En esta condición, si la fábrica es del primer orden, la dilatación en caso de fuego no ofrece en absoluto ningún peligro. Este hecho hace a este género de material el más valioso para construcciones abovedadas.

## El mortero

Mediante el uso del mortero se consigue unir la piedra o el ladrillo entre sí a fin de crear monolitos artificiales que representan la perfección ideal que se desea obtener en las obras de fábrica. El mortero rellena los intersticios y los huecos entre la piedra o el ladrillo. Así se distribuye la tensión de compresión y se evita el deslizamiento por el aumento de la superficie comprimida. La verdadera construcción monolítica también se consigue mediante simples mezclas de ce-

mento, lo mismo que por el empleo de morteros de cemento con piedra machacada o cascajo. El cemento llena, como en el caso precedente, los espacios entre el ladrillo, la piedra, el cemento o la grava. La función del mortero es, por consiguiente, dar la máxima superficie de rozamiento a los materiales que une, ya sean éstos piedra o ladrillo, y llenar los huecos e intersticios. El mejor mortero es el que, después de recibido, se vuelve tan sólido como la piedra o el ladrillo que une. La mejor fábrica y el mejor hormigón son los que tienen todas sus juntas completamente rellenas con dicha clase de mortero. Por lo cual podemos inferir que el mortero debiera prepararse de acuerdo con la clase de fábrica en que ha de ser empleado.

Los elementos primarios de los morteros son la cal, con o sin una mezcla variable de arcilla, por una parte, y la arena (en estado natural o modificada), por otra. No obstante, en la actualidad los usamos en relaciones y proporciones por completo nuevas. Por ejemplo, los morteros romanos y bizantinos y los de la época colonial de México se componían de cal y silicato de alúmina (ladrillo molido o lava) y arena. En otros términos, contenían arcilla y arena más o menos naturales o añadidas. No obstante, nuestros nuevos morteros de cemento Portland son cal, silicato de alúmina (arcilla) y arena. En razón de las proporciones en que entra cada uno de los componentes y a la forma de tratamiento, su rapidez de fraguado es tal que en treinta días puede compararse con los morteros del Panteón de Roma o de otras construcciones semejantes que cuentan siglos de existencia. Aunque parece muy sencillo conocer la manera de fabricar esta clase de cemento, el llegar a los actuales resultados ha costado más de un siglo de experimentos y trabajos.

En 1791, Parker comenzó sus estudios sobre este material. En esa fecha obtuvo el privilegio exclusivo para sus productos y, más tarde en 1796, para otros. Algunos años más tarde, Medina registró una marca de cemento que llamó «romano». Puede asegurarse que hasta hace treinta años la fabricación del cemento Portland no pudo establecerse sobre bases técnicas moderadamente aceptables, debido a su falta de regularidad.

Con el uso de los materiales conglomerantes hidráulicos, es decir, de morteros que no necesitan exponerse al aire para que obtengan un fraguado rápido, hemos llegado al renacimiento de la construcción cohesiva. Bajo estas condiciones,

la fábrica entra a formar parte de los materiales «moldeados» que no sólo trabajan a compresión sino que también lo hacen, hasta cierto punto, a tracción.

Debido a que este cemento es el único material descubierto al cual se debe el cambio en la construcción de fábrica conforme a las necesidades y a los progresos modernos tal vez se piense que la obtención de los morteros hidráulicos, los de la clase de Portland en especial, es sobre todo lo que se requiere para llegar a la solución de todos los problemas actuales de construcción donde es necesario el empleo de la fábrica. Así parece a primera vista, pero ese no es el caso.[11] Con el objeto de que los morteros de cemento Portland puedan llenar sus importantes funciones en la fábrica moderna deben protegerse durante y después del fraguado.

## Inconvenientes de la arena y la piedra sobre el mortero si la mezcla no está protegida

El material empleado para la mezcla y consistencia del mortero es arena o piedra finamente machacada, pero ni éstas favorecen al fraguado del cemento ni lo protegen después, según se demuestra por los siguientes experimentos.

*Primer experimento*

Se mezcla cemento con arena de buena calidad para lo cual deben adoptarse todas las precauciones para procurar que esté seca, libre de arcilla o de cualquier sustancia terrosa; condición algo difícil de asegurar económicamente en la práctica, sobre todo en grandes masas.

Si una vez fraguado el mortero se expone a la acción del fuego, se notará su completa destrucción antes de alcanzar 425ºC.[12] No hay ningún ejemplo de que tras haberse declarado fuego en un edificio en el cual hay mortero expuesto —ya sea de cal o de cemento— este mortero no se desmorone a los pocos minutos, dejando expuesto el material que cubría, sea ladrillo, material metálico o cualquier otro parecido. Esto se debe, no al cemento, sino a la mezcla de piedra o arena, sin importar su clase. El cemento solo sufre y su cohesión se destruye en cierta medida si se expone a la acción del fuego. Sin embargo, con la mezcla de arena o piedra su destrucción es completa, aun a más baja temperatura.

*Segundo experimento*

Veremos ahora cómo actúa el cemento por sí solo, y cómo actúan el cemento y la arena. Se toma una probeta de cemento de buena calidad, de la clase que se hace para probar su tenacidad, y se ensaya a rotura a las 24 horas. Supongamos que ésta se produzca para 1,4 N/mm$^2$.

Se coge la misma cantidad y calidad de cemento, se moldea al mismo tiempo, pero se incrementa un tanto la cantidad de agua que se mezcla con él. Se somete a la misma prueba a las veinticuatro horas y se notará una disminución en resistencia que en muchos casos llegará a un cincuenta por ciento. La razón es que la sección tendrá la misma superficie, pero es menos compacta. Es porosa, esponjosa. Todo el espacio ocupado por el agua queda desprovisto de cemento.

Pero en la práctica no podemos estar en constante vigilancia de los trabajadores encargados de la manipulación del cemento, la arena y el agua, bien sean mezclados a mano o por medio de máquina. Sabemos que estamos en sus manos. Es imposible decir qué concesión deberá hacerse a sus deficiencias en el empleo de una mayor cantidad de cemento o de una menor proporción de arena. Esto puede afectar a los gastos y desembolsos del contratista. Mas por lo que se refiere al resultado, este exceso de material es completamente innecesario, porque aun empleando sólo el cemento, si existe un exceso de agua, el error subsistirá. La sencilla falta de cuidado que se tenga en añadir agua para mezclar el cemento, antes de mezclarse con la arena, es suficiente para obtener un mal resultado. Si este mortero se mezclase con hormigón o se usase para rellenar espacios o cavidades, tendríamos el mismo resultado, es decir, el mortero poroso.

*Tercer experimento*

Se extiende una capa de mortero de cemento de unos 6,5 mm sobre la superficie horizontal de una rasilla. Se coloca encima otra rasilla de la misma clase. Transcurridos algunos minutos, al intentar separar las rasillas del mortero de cemento, se encontrarán adheridas, a causa de que el mortero sin exceso de agua aparente ha comenzado a fraguar en condiciones favorables. En el examen de este hecho se podrá observar lo siguiente:

1. La rasilla ha absorbido el exceso de agua dejando sólo la humedad necesaria para el buen fraguado del cemento.
2. Durante el fraguado o cristalización y a causa de la acción física, la rasilla ha absorbido el exceso de humedad del mortero, o éste, si le ha faltado humedad, como ocurre en las horas de más calor en el verano, la absorbe de la rasilla. Se ha formado en esta operación el vacío en las celdas porosas de la rasilla. Debido a este vacío la superficie de la rasilla está apretada contra el mortero y cierra completamente los espacios huecos. Se forma una unión perfecta, hasta el punto de que no se da un solo caso en el que una parte de bóveda o cualquier construcción compuesta de dos o tres rasillas y cemento, pueda quebrarse sin que se note la perfecta unión de la masa.

Si el tiempo es seco o caluroso, o si la obra se expone al sol, la rasilla protege el cemento del calor que, como ya se sabe, es perjudicial a su fraguado. Si el cemento, con el tiempo, se expone a los efectos de un fuego directo, se encontrará que la rasilla protege el mortero.

## Inconvenientes del mortero y hormigones para la construcción de bóvedas

Es cierto que actualmente se emplea el cemento con la arena, la piedra machacada o la grava, reforzados con mallas de alambre. En los últimos años ha existido y existe aún la tendencia favorable al uso de hormigón[13] o cemento y sus combinaciones con elementos metálicos de atirantamiento o refuerzo. Se han hecho nuevas aplicaciones en tabiques divisorios, pisos y techos. Mas después de examinar las circunstancias, debemos reconocer que se debe a la ignorancia de otro medio más adecuado para satisfacer las necesidades de la construcción moderna y a la falta de análisis. Se acompaña por la creencia de que así se evita el empleo de trabajadores expertos dotados de la habilidad necesaria para elaborar la clase superior de construcción monolítica de cerámica consistente y cemento Portland, por ejemplo. Se confía al obrero no especializado e ignorante una operación tan importante y delicada como el manejo de materiales rápidos como el cemento Portland, en particular en las bóvedas, suelos o techos de piedra.

En nuestros días, después de un siglo de intentos reiterados de carácter irregular y con mejores materiales que los que poseían los romanos, el uso del hormigón en la construcción se abre paso, ganando cada día más predicamento y favor, debido a los inflexibles reglamentos de los sindicatos de trabajadores —en especial el de los albañiles—, que deja una gran cantidad de trabajo de la construcción de fábrica para la mano de obra sin especializar, como sucedía en la época de los romanos. Esto es todo lo que hay en el asunto. Pero pronto ha de ocurrir una reacción (ya iniciada) que aumente los salarios del obrero en la construcción de hormigón al nivel de los albañiles especializados en la fábrica de cerámica cohesiva. Entonces se pondrán de manifiesto las desventajas del hormigón.

Esta lucha entre ambos sistemas, es decir, el sistema monolítico de hormigón y el de cerámica, existe desde que se conoció la construcción de fábrica. Es la lucha entre el trabajo adocenado —que emplea materiales rudos para construir masas de gran volumen y peso— y el trabajo inteligente —que escoge los materiales de mayor resistencia, menor peso y volumen. La batalla no podía haber tenido mejor campo que durante la civilización romana, cuando la esclavitud permitía disponer de fuerza física ilimitada a escaso costo con trabajadores inexpertos. Por consiguiente, la construcción de hormigón estaba en su apogeo. En realidad, ambas partes —construcción de hormigón y construcción de ladrillo— han gozado de distintos periodos de prosperidad y decadencia, según que las condiciones políticas y sociales eran favorables o desfavorables a la aplicación de cada sistema.

Hemos citado el Panteón de Roma. Esto nos servirá para explicar por qué la gran adquisición del cemento Portland, así como los inconvenientes de los morteros y hormigones, no son suficientes para la construcción de bóvedas. La cúpula que cubre en la actualidad el Panteón y que se atribuye a la época de Augusto no es la misma que construyó Agripa. El techo de esa época se derrumbó o se deshizo, tal vez por los defectos de construcción. Según veremos más tarde fue el mismo caso que la cúpula de Santa Sofía. Nos asalta la duda de que fuese una cúpula, porque el plano de la construcción de Agripa era cuadrangular. Se ha descubierto ahora (en 1892) que la cúpula, y parece que también el muro circundante, los construyó Adriano unos ciento cincuenta años después. El gobierno francés determinó, hace unos diez años, llevar a cabo reparaciones en la cúpula

de este edificio.[14] Ya intencionalmente, ya por accidente, o por necesidad, hubo que extraer algunos ladrillos que formaban parte de la construcción. Estos estaban marcados, como muchos otros que se encontraron en los edificios antiguos de Roma, con el periodo del Imperio y el año de su fabricación y se vio que se correspondían con la época de Adriano, es decir, unos ciento cincuenta años después de Augusto. Este descubrimiento parece explicar la diferencia notada entre la base del Panteón y la cúpula. Se deduce de aquí que la cúpula que Augusto hizo construir fuera toda o en parte de hormigón.

La cúpula semiesférica se construyó mediante una serie de pequeños arcos de medio punto desde su base. Después se levanta otra serie de arcos que arrancan desde la clave de los primeros. Para formar los casetones levantaron series de costillas o arcos en la dirección de los meridianos de la esfera. Todos estos arcos se construyeron con los ladrillos de canto, como dovelas. Fue absolutamente necesario colocar de extremo a extremo cimbras sólidas y muy pesadas. Dichos arcos son la parte superficial de los casetones, que se hicieron más tarde con materiales enrasados o moldeados. Se trata con toda probabilidad de un hormigón fabricado con piedra porosa semejante a la piedra pómez o lava del Vesubio y mortero de cal mezclado con puzolana (la piedra porosa de puzolana se emplea de forma parecida en las islas Baleares).

Queda probado que el Panteón no es rigurosamente una construcción de hormigón. Aunque ésta sea la opinión general, resulta ser esencialmente una construcción de ladrillo. Esto es, el ladrillo forma la parte constructiva y el hormigón se usa sólo como relleno (como se refleja en la obra de Choisy).

Sin embargo, deberíamos admitir que hay una diferencia entre las prácticas de esas épocas tan distantes a favor de las prácticas de nuestros días. Los partidarios modernos de la construcción de hormigón han sido prudentes hasta ahora. Han limitado su campo de operaciones a la construcción de bóvedas mucho más modestas que las de sus antecesores, los arquitectos romanos. Evitan sabiamente exponerse a la crítica que en lejanos días hiciera Vitruvio del conjunto de las no siempre afortunadas construcciones de Augusto. Vitruvio era ya muy anciano en tiempo del emperador. Había sido su ingeniero militar en las grandes campañas de su primera época. Tiene escritos en los que critica la práctica tolerada y directamente recomendada por Augusto,[15] debido a los accidentes y muertes de esclavos

que dicha práctica causaba. Recomendaba el uso de ladrillo, en parte o por completo, en vez del hormigón.

Quizá debido a los clamores y críticas de Vitruvio, se introdujo durante el gobierno de Augusto, Tito y los siguientes emperadores, la construcción de armaduras de ladrillos embebidas en el hormigón en muros, arcos y cúpulas. Tenían el objeto de darles suficiente rigidez durante el proceso de fraguado y asegurar el reposo necesario, que las simples cimbras de madera no siempre aseguran. De este modo se redujo el número de accidentes, hasta que más tarde lograron obtener mayor rigidez, cuando descubrieron el uso de una armadura más rígida, formada con grandes ladrillos sentados de plano y recibidos con yeso, según suponemos. Decimos «suponemos» porque todos los que se han interesado en descubrir la composición del material adherente a los ladrillos usados en estos edificios antiguos y que se han encontrado en algunas de las estructuras, han demostrado que es una especie de silicato y carbonato de cal. Mas esto no significa que fuese mortero de cal común, pues a causa del largo tiempo transcurrido, la filtración del agua de lluvia a través del hormigón ha disuelto la cal de éste de forma que se ha precipitado al fondo de la masa y se ha mezclado la solución con el yeso ya saturado o degenerado. El resultado es un carbonato de cal tan sólido como el mármol.

En la actualidad, los constructores de hormigón deben limitar sus aspiraciones y construir bóvedas de dimensiones moderadas comparadas con las que usaron sus predecesores. Aún éstos fueron capaces de tender grandes bóvedas gracias al trabajo de los esclavos y debido a las diferentes condiciones de esa civilización tan antigua. Todavía en este caso sólo la tiranía de las cabezas coronadas fue lo suficientemente poderosa para llevarlo a cabo, sin parar mientes en los peligros que comprendían. En otro estado de cosas, ningún arquitecto o constructor, por apto que fuese, podría llevarlo a feliz término, por falta de poder y autoridad suficientes para proceder de acuerdo con su propia voluntad, sin oír la voz de los filósofos de la época, que desempeñaban entonces el papel que desempeña la prensa hoy en día,[16] y que condenan tales prácticas como peligrosas y criminales, conforme lo han hecho notar recientemente algunas publicaciones técnicas importantes.[17]

Si observamos y comparamos atentamente las construcciones romanas y nos fijamos en los diferentes sistemas, tales como construcciones de hormigón,

ladrillo y piedra, podremos ver cuál era la durabilidad de cada uno con relación a su resistencia. El examen demostrará que la masa y el peso estaban en razón inversa de la calidad del material y el esmero en el trabajo, y también que la construcción de hormigón tiene un límite de tamaño. En las grandes luces se exigía una fábrica más firme y selecta como, por ejemplo, ladrillo, rasilla o piedra labrada fijada con material apropiado, de modo que una bóveda pudiese tener el apoyo necesario para su mejor afianzamiento. La razón de esto no es difícil de comprender: cualquier constructor experimentado sabe muy bien que es posible construir un arco de ladrillo entre dos estribos sin necesidad de mortero. Su resistencia derivará de la fuerza de gravedad y del rozamiento consiguiente sobre la tensión transmitida de ladrillo a ladrillo desde los arranques. Un arco construido de esta manera no se deforma y la cimbra puede retirarse sin dificultad.

En cambio, no se puede practicar la misma operación con mampostería u hormigón en seco en construcciones abovedadas porque en ambos casos es preciso apoyarse sobre una cimbra rígida. Por esto Vitruvio criticó, en vista de los accidentes, el empleo del hormigón en ciertas construcciones atrevidas de la época de Augusto que dieron como resultado una nueva evolución: el empleo de refuerzos o armaduras de ladrillo como elementos constructivos. Es evidente que con la arena o la piedra machacada por sí mismas no se puede construir en seco o sin mortero, sin ningún apoyo o sin reposar exclusivamente sobre una cimbra de madera durante su construcción. Por otra parte, si se usan ladrillos como dovelas funcionan por sí mismas como una construcción por gravedad, sin tener en cuenta el mortero. Además, en el caso de arena y piedra machacada, después de mezclar el cemento —en el caso contrario el riesgo es evidente— y en el de ladrillos a sardinel, el fraguado de los morteros ha sido y será siempre un problema como lo son los materiales colados en general. Por esta razón las vigas y jácenas de hierro fundido no han durado más de treinta años.

En Italia y en otros países de Europa meridional hay sótanos para la conservación de las carnes y vegetales en frío que se cubren con ladrillo sentado en seco. En varias regiones de Europa es aún una práctica corriente construir cúpulas de 3,7 a 4,6 m de diámetro con piedra en seco, sin ningún mortero, pero jamás se ha visto un arco o cúpula, aun de reducidas dimensiones, construido de piedra ma-

chacada u hormigón sin cemento o mortero. Esto prueba claramente la diferencia en cuanto a la utilidad entre ambos materiales. Además, no recordamos ninguna cúpula existente totalmente construida con mortero u hormigón, que no se soporte estrictamente por medio de una cimbra o fábrica. Como excepción hay algunas relativamente pequeñas. Algunas de ellas pertenecen al periodo romano, por más que no estamos seguros de que no se usaron como cimbras bóvedas tabicadas provisionales, que se quitarían más tarde para su enlucido y decorado. Es muy posible que así fuera, si se tiene en cuenta esta práctica romana, no sólo en Italia, sino en todas las colonias del Imperio donde se construyeron edificios de esta clase. Con todo, sabemos bastante bien que se construyeron muchas cúpulas de ladrillo sin ninguna cimbra sólida y rígida. Esto es un paso decisivo en el sistema constructivo, considerado científicamente, sobre el hormigón porque el material se soporta a sí mismo sin el auxilio de una cimbra sólida. Por lo tanto se trata de una garantía de éxito.

Ahora bien, cabría preguntarse si existe otro sistema de bóvedas para grandes luces superior al tabicado. La respuesta es que los romanos han dado en sus admirables construcciones algunos ejemplos decisivos para contestar definitivamente a esta pregunta. Lo que se ha dicho de la comparación entre las bóvedas de hormigón con las de ladrillo es válido para la de éstas con las tabicadas que los romanos lograron fabricar con tanta fortuna para soportar las pesadas masas de hormigón cubriendo grandes espacios, según podemos comprobarlo en los párrafos que siguen a continuación.

## Ventajas de la rasilla frente al ladrillo común en la construcción de bóvedas

Prosiguiendo nuestra línea de argumentación estudiaremos ahora las ventajas de la arcilla cocida sobre el hormigón o los conglomerados de piedra como medio de construcción monolítica para arcos y bóvedas. En primer luar, es preciso resaltar que el ladrillo común —aun si se recibe con mortero de cemento para darle cohesión—, a causa de su peso y forma, y a pesar de su superioridad sobre los hormigones, no reúne las ventajas de los ladrillos más delgados o rasillas, que tienen mayor superficie y se sientan de plano en vez de hacerlo como dovelas. El origen de las bóvedas tabicadas que se emplean en el levante

español está en el sistema empleado por los romanos para hacer las cimbras permanentes de sus bóvedas. Este sistema consistía en colocar una hoja tabicada de rasillas reforzada con costillas de ladrillo sobre las que se vertía el hormigón.[18]

Este sistema tabicado es una modificación del sistema romano: se ha pasado del uso de una bóveda auxiliar de una simple hoja de rasillas, a la construcción directa por hojas o capas superpuestas. La práctica se ha perfeccionado al modificar las dimensiones de las rasillas, y mejorar sus características, procurando aumentar su rozamiento y darle mejores condiciones refractarias. Con esto se ha conseguido ampliar su horizonte, pues se construye y se decora al mismo tiempo. Se ha aplicado un nuevo *modus operandi* conveniente a los materiales más modernos y, sobre todo, se ha reducido el empleo de la cimbra a la simple función de servir de forma o guía, al extremo de ser la bóveda misma su propio apoyo durante la construcción. Por último, se asegura al sistema una expresión técnica mediante ensayos eficaces para obtener valores de resistencia con el objeto de garantizar su aplicación en suelos, techos, cubiertas y puentes. Este sistema, debido a toda esta obra de aplicación, ha establecido al material cerámico en su terreno propio, es decir, la construcción monolítica o cohesiva de arcilla cocida aplicada a las construcciones más importantes y arriesgadas en todo edificio de fábrica, ya sea monumental, de utilidad pública o privado.[19]

Esta cualidad de ser su propia sujeción es muy valiosa para cubrir los espacios con grandes bóvedas. Es por sí misma una garantía de seguridad constante durante la construcción, lo cual es también una garantía de durabilidad. Esta condición no existe ni probablemente nunca existirá en ningún sistema de bóvedas de hormigón.

En los últimos treinta años se han realizado experimentos, análisis y estudios detallados sore la función del mortero hidráulico y su empleo en las fábricas de ladrillo, piedra o rasilla. Estas investigaciones, unidas a pruebas de resistencia, han conducido a una nueva forma de construcción. La combinación de la rasilla y mortero hidráulico Portland ofrece condiciones únicas entre todos los materiales por su mayor resistencia y su mejor fraguado. El resultado ha sido el triunfo de las grandes cúpulas y escaleras tabicadas, construidas con o sin refuerzo. El procedimiento parece ahora muy sencillo, racional y practicable por los medios

corrientes de la fábrica. Es, sencillamente, fábrica de arcilla cocida atirantada en vez de hormigones armados o reforzados.

Esta descripción no la hacemos aquí con el objeto de defender ninguna construcción especial —en contraposición a los intereses de sus oponentes— ya que nuestro propósito se reduce a exponer hechos, experiencias y razones. Por la misma razón de que tenemos confianza absoluta en la construcción cohesiva, deseamos que cada uno de estos materiales, en la forma de conglomerados de piedra o de arcilla cocida, puedan ocupar el puesto importante que por derecho, eficacia y utilidad especial, está destinado a llenar.[20]

De lo que antecede se deduce el siguiente hecho: la adquisición del cemento, según expresamos al principio, parece bastar para todas las necesidades de la fábrica moderna. Sin embargo, no siempre encuentra las condiciones adecuadas. En determinados casos es necesario que la concurrencia de materiales apropiados acompañe, facilite y proteja el cemento durante su fraguado y aun después. Este material es la rasilla bien cocida. La más preferible es la de clase semirrefractaria de dimensiones adaptables, puesto que estas dimensiones se regulan conforme al tipo de obra y en función de dónde han de emplearse. Estas rasillas tienen que ser semirrefractarias porque cuando se fabrican necesitan llegar a una temperatura más alta que la que puede desarrollarse en un incendio en el interior de un edificio. La rasilla de esta clase deberá soportar de 1.100 a 1.200ºC. De esta manera puede proteger el cemento pues se ha cocido a una temperatura más elevada que la que puede haber en un incendio. La superficie de la rasilla no debe contraerse para que el conjunto proteja la hoja superior. Esto no sucedería si la rasilla no fuese refractaria.

Nos queda la duda de si se deberían excluir de la composición arquitectónica materiales tan nobles como el mármol y el granito. El mármol, jaspe y granito de colores decorativos pueden emplearse en el embellecimiento de superficies, lo mismo que todo material constructivo y decorativo, pero deben permanecer en su lugar, porque toda belleza tiene sus deficiencias inversamente compensables. La Naturaleza ha establecido esta condición admirable en todas las cosas, de modo que todo pueda ser útil y tener un valor relativo.

Por lo que ya se ha dicho, debe comprenderse que actualmente la función de los materiales difiere de lo que fue en el pasado. Estos no sólo han de resistir

bien las cargas requeridas en los suelos y otras funciones materiales, sino que también han de reunir las condiciones requeridas por las ordenanzas municipales de construcción con respecto a la higiene, la protección y la resistencia contra incendios. Esas normas tienen por mira obtener materiales y métodos de construir adecuados para todo el edificio, lo suficiente para resistir la acción destructora de los elementos y que sean garantía de condiciones sanitarias para sus habitantes.[21]

## La función material o mecánica de la fábrica en las construcciones modernas

La función material o mecánica de la fábrica moderna[22] es construir la totalidad del edificio o proteger y ayudar a otros materiales y procedimientos que, con la intención de mejorar las condiciones sanitarias, son también los más resistentes contra la acción destructora de los elementos naturales. Esta definición, que parece de escasa consecuencia, presenta inmensas dificultades al arquitecto o ingeniero cuando necesita aplicarla a cualquier estructura. En efecto, sabemos que no existe ni nunca existirá un material completamente inalterable o de existencia eterna. Esto quizás se puede deber a las condiciones regulares impuestas por la Naturaleza en sus evoluciones y existencia condicional. Mas también es cierto que nos enseña y sugiere cómo preservar sus obras contra los efectos destructores de los elementos. En la especie animal, en el hombre por ejemplo, que es la obra más perfecta del Creador, encontramos el sistema nervioso y el esqueleto —la parte mecánica— sensibles ambos a los cambios atmosféricos, pero protegidos, decorados y embellecidos por los músculos y la piel, sin que haya nada más armonioso ni más estético.

Cabe preguntarse por qué no emplear las nobles y arquitectónicas masas constructivas de fábrica, que son el medio más adecuado para la expresión de la Arquitectura, como principal elemento de construcción y además de protección, decoración y embellecimiento del esqueleto mecánico de hierro. Todo esto es enteramente racional. Entra de lleno en el clasicismo de nuestra época, es decir, de nuestras modernas, complejas y atirantadas construcciones cohesivas, con el objeto de hacerlas más estéticas, como entraron en el clasicismo las construcciones por gravedad en la civilización griega.

## Concepto y función del esqueleto de hierro

Uno de los problemas de construcción más interesantes que han tenido que acometer los arquitectos en todos los tiempos en los edificios de carácter utilitario ha sido asegurar la mayor cantidad posible de espacio utilizable y de estabilidad con la menor superficie ocupada por muros y masas de construcción.

Hay dos motivos que hacen deseable la reducción del espacio ocupado por los elementos constructivos: la economía del trabajo y materiales y el ahorro de superficie. La última de estas necesidades se nota más en los grandes centros urbanos, desde que las ordenanzas municipales —las leyes de la comunidad que debieran reglamentar los intereses sociales— dejan a los propietarios en libertad de ocupar *ad infinitum* el espacio vertical sin restricción alguna por lo que respecta a la luz, salubridad, higiene y facilidad de tránsito de sus vecinos y del público. Esto permite al propietario aumentar el precio de sus solares porque se le autoriza a añadir un piso más. En vista de que puede añadir otro piso vuelve a aumentar el precio del suelo, entrando en ese círculo vicioso.

Estos exorbitantes precios del terreno —que obligan por una parte a reducir el espacio ocupado por los elementos constructivos— y la enorme carga provocada por el considerable número de pisos superpuestos —que requieren mayor volumen de muros— han obligado a los arquitectos a buscar en el hierro una ayuda para la fábrica. El hierro permite la reducción del espesor de los muros en virtud de la alta resistencia a compresión que presenta. Así mismo, la reducción de los muros y la superposición de los pisos han hecho necesarias las construcciones arriostradas. Por tanto, el hierro auxiliar funciona tanto a compresión como a tracción. La doble función del hierro en un edificio, es decir, como auxiliar para compresión vertical y horizontal, ha dado origen a un nuevo sistema de construcción. Antiguamente se empleaban materiales perecederos, como madera y metales, en calidad de auxiliares y se reducía al atirantamiento. El origen de esta práctica se encuentra en las construcciones orientales y en sus derivados, las cúpulas romanas y bizantinas. Ambas civilizaciones fueron, no sólo en sus necesidades, sino también en sus prácticas de construcción cohesiva, las iniciadoras o autoras de los preludios de estas prácticas. A esta especie de construcción auxiliar de hierro, con compresión vertical y horizontal, se le ha dado el nombre de «esqueleto»,

una calificación muy sugerente para basar sobre ella la filosofía de la misma en conjunto con la fábrica, cuando se aplica a edificios de materiales cohesivos. En el pasado se hicieron intentos para llevar a cabo la fábrica con armadura, precisamente por las mismas civilizaciones que emplearon la construcción cohesiva. Por eso, la tendencia y los esfuerzos manifestados en el presente hacia ese fin, y por lo que tanto se trabajó en los últimos años del siglo XVIII, no son cosa nueva.[23]

## Clases de armaduras de hierro

Se pueden considerar tres clases de armaduras de hierro para un edificio.

1. Una armadura que tome el peso total en cualquier punto y altura del edificio y sea independiente de la fábrica. Es decir, una armadura lo bastante fuerte y combinada de tal manera que pueda tomar el peso de los muros y particiones en cualquier piso del edificio sin que se hayan construido los muros de los pisos más bajos. La fábrica sólo se usa como una protección al hierro.
2. Una armadura que tome el peso total de cada piso y muro en conjunto con la fábrica que reviste el hierro. Por consiguiente, no debe construirse ningún piso o muro más altos hasta que lo hayan sido los precedentes más bajos, ya que el hierro se protege por la fábrica que le refuerza.
3. Una armadura que tenga solamente la resistencia necesaria para reforzar la fábrica en su función más débil —la tracción— o bien una armadura protegida por la fábrica y ésta a su vez reforzada por el hierro. Así se otorga resistencia adicional a la fábrica.

El primer ejemplo es una variación del concepto racional del esqueleto. Es una construcción de hierro destinada a revestirse con una capa de fábrica, tan sólo para proteger el material perecedero tanto de la lenta como de la rápida oxigenación. La fábrica se desposee por completo de su misión constructiva y queda reducida a una función protectora. Así, el hierro tiene preponderancia sobre la débil capa de fábrica, de forma que cualquier desplome o desviación de la vertical de las armaduras superiores —como a menudo se ve— o cualquier vibración causada por los vientos fuertes o por algún accidente puede iniciar el agrietamiento de la fábrica o su separación del hierro. Se corre especial peligro en aquellos edificios en los que, por ha-

ber elevado la construcción con más pisos, se ha subido el centro de gravedad.[24] Por eso, bajo estas circunstancias y con esta clase de armadura, el edificio no puede tener un carácter permanente. El exceso de hierro es perjudicial.

En el segundo ejemplo, la fábrica, como parte de la construcción, refuerza el esqueleto y le comunica más estabilidad. El centro de gravedad del edificio se conserva en el punto más bajo en cualquier fase de la construcción, y la fábrica protege y añade peso al hierro. El hierro, que a su vez deriva estabilidad a la fábrica, no la priva de su noble misión. Es bien sabido que la fábrica de cemento se adhiere perfectamente al hierro. Si durante el fraguado no se ha perturbado, se adhiere formando una masa que es difícil separar. Este fraguado se ve favorecido por la muy valiosa condición de que la dilatación térmica del hierro y la fábrica es la misma. La teoría es que cada uno de los materiales, cuando se coloca en la forma descrita —cada uno debe tener sección suficiente, como si debiera soportar la totalidad independiente del otro—, no debe aplicarse cuando la fábrica se compone de materiales cohesivos modernos, es decir, la fábrica con morteros de cemento Portland, que son de fraguado relativamente rápido. De aquí que tras el fraguado las secciones del hierro y de la fábrica que reciben la carga, estén en razón directa de sus respectivos valores. Además, la fábrica trabaja con seguridad al 10% de la rotura. El hierro ayuda frente a la flexión lateral por su rozamiento con la fábrica. Así mismo, el momento de flexión lateral en un pilar o muro de fábrica puede aumentarse si la sección del hierro se proyecta y coloca para conseguir este fin. Esto es, la mayor sección del hierro se colocará en el extremo de la sección más próximo a la parte que trabaja a tracción.

En el tercer ejemplo, la fábrica es la estructura principal y constituye la verdadera construcción. El hierro se emplea principalmente para mejorar la resistencia a tracción de la fábrica. Tiene la ventaja de que ambos materiales tienen prácticamente la misma deformabilidad, consiguiendo que la fábrica así reforzada tenga la misma resistencia a tracción como tiene a compresión.

## Relación proporcional entre el hierro y la fábrica

En el primer caso antes descrito, la armadura de hierro es la construcción material directa, ya que la única función de la fábrica es proteger el hierro. El interés

arquitectónico de dicha estructura dependerá sólo de las adicciones parciales de cuerpos (puertas de entrada, por ejemplo) y de fábrica protectora, más o menos arquitectónicamente tratada, que tiene siempre un carácter decorativo convencional sin ningún valor estético.

La cantidad de hierro para el segundo caso deberá estar también en proporción directa a ambos coeficientes de resistencia de la fábrica (compresión y tracción), además del aumento adicional en ambos por tracción y compresión equivalente a la suma de compresión sobrepuesta en la fábrica sobre los 1,4 N/mm$^2$ (que es lo que la fábrica puede cargar con seguridad al 10% de la rotura). No se tomará en consideración ningún exceso de compresión por el hierro adicional en la proporción de 83 N/mm$^2$ de hierro a compresión, (que varía de acuerdo a la relación entre el diámetro y la longitud de la columna), y 110 N/mm$^2$ a tracción.

En el tercer caso, para reforzar bien la fábrica y que ésta conserve su propio carácter constructivo, se deberá introducir en la construcción la suficiente sección de hierro para evitar que la fábrica trabaje a tracción. Además, el hierro se situará donde la fábrica lo proteja contra toda oxidación.

La resistencia típica a compresión de la fábrica cohesiva bien construida con un mortero de cemento Portland es aproximadamente de 1,4 N/mm$^2$ (con una seguridad del 10%). Sin embargo, el coeficiente de tracción de la misma fábrica, es sólo de 0,2 N/mm$^2$ (10% de seguridad de los 20 N/mm$^2$ de rotura). Por consiguiente, en ninguna construcción donde se esperan recibir solicitaciones laterales, como en pilares de fábrica o en pilas de puentes, debe procurarse, a fin de librar a la fábrica de trabajar a tracción, que el hierro se coloque de tal modo que contrarreste el empuje lateral. Esto es, el hierro se colocará hacia el lado o repartido entre los lados donde la fábrica pueda trabajar a tracción.

## Función estética de la fábrica

Aunque hemos definido la función material o mecánica de la fábrica como construcción directa y como auxiliar no quiere decir que esta clasificación exceptúe a la fábrica de su más noble misión de construir y decorar al tiempo (a la vez que protege los materiales de construcción perecederos). Esta misión satisface el ideal más elevado de la Arquitectura, ideal que es efecto de su verdadero objetivo y finalidad

y del cual la fábrica es el verdadero y único medio de expresión. Sólo dos pueblos o civilizaciones lograron realizar este ideal por medio de diferentes fábricas, que representan para nuestra tesis dos campos diametralmente opuestos: la civilización griega y la hispano-musulmana. El arte griego, en su más alto desarrollo intelectual, triunfó al alcanzar el verdadero clasicismo. Construían y decoraban su arquitectura dentro del sistema de construcción por gravedad, que fue también el sistema de sus predecesores, los asirios y los egipcios. En sus días de esplendor, la civilización hispano-musulmana llegó a expresar el mismo ideal de construir y decorar a la par su arquitectura interior dentro del sistema de construcción cohesiva, que adoptaron de las anteriores civilizaciones persa, grecorromana, bizantina, turca y árabe.

Es evidente que la arquitectura actual no está en el mismo caso sugerente que la arquitectura griega en su relación con la egipcia. Como dice Aitchinson, «la arquitectura griega era una invención puramente artística; su principio constructivo era el mismo de la egipcia». Por lo tanto su filosofía, basada en la construcción de madera y por gravedad, pero construida en piedra, fue la filosofía de la arquitectura que floreció en la época anterior a Pericles.

Nuestra arquitectura contemporánea tiene una construcción racional moderna. Su principio constructivo es de nuestra época: el principio del esqueleto, materiales apropiados a sus fines mecánicos que nos ponen en aptitud de evitar la acumulación de masas inadecuadas, tan impropias como lo sería el tratar de sustituir con musculatura carnal la función del esqueleto humano. Nuestra arquitectura, influida por nuevos materiales, la armadura de hierro, el atirantamiento introducido para evitar el empleo de estribos, y la necesidad de proteger estos materiales perecederos, no puede tener una expresión tan sencilla como la que tenía en el arte griego. Nuestro procedimiento es nuevo, filosófico, y armoniza mejor con las enseñanzas de la Naturaleza y con nuestra propia experiencia. No son las grandes masas constructivas de los romanos y bizantinos que hemos mencionado en nuestros *Prolegómenos*, cuando se citaban las palabras de Viollet-le-Duc, Pablo Milá, Sturgis y Marshall, en términos diferentes pero con idéntica intención: «la arquitectura de los romanos es una fábrica revestida con decoración griega, y este revestimiento es de la belleza arquitectónica visible. Pero de hecho, sólo la construcción interior es la verdadera arquitectura». Viollet-le-Duc asegura por cuenta propia que es «un bellísimo engaño».

Nuestra arquitectura es una sugerencia directa de la Naturaleza. Es el esqueleto mecánico, racional, embellecido, protegido por fábrica con formas artísticas constructivas. Para ello emplea materiales moderados como debieran usarse: silicato de alúmina, que es el que mejor preserva el hierro. Esto significa la construcción por asimilación o cohesiva decorativa. De la misma, el clasicismo musulmán ha dejado sublimes ejemplos en sus arabescos que, semejantes a nuestra piel, nuestro más bello ropaje, recubren con sus constructivos colores cromáticos. No queremos decir con esto que el arte musulmán debiera imitarse o plagiarse en sus detalles artísticos, ¡en modo alguno! Sólo que debiera seguirse el procedimiento constructivo de cubrir por asimilación, como en la construcción cohesiva o monolítica, con noble fábrica, pero sin juntas visibles o distribución estereotómica que indicaría dualidad de sistemas de construcción (lo que es en el fondo una confusión de estilos) con el objeto de preservar nuestras concepciones arquitectónicas de construcciones duales o complejas dentro de nuestra teoría.

El Art Nouveau también se basa en la idea de superficies cohesivas. Presenta transiciones suaves entre los distintos planos en lugar de ángulos. Estas curvas se pueden adaptar a la construcción sanitaria —para evitar los espacios angulosos donde el aire quede confinado y no pueda renovarse— como un principio importante de higiene aplicada a la construcción. Esta idea amplificada comprende también la restricción de excesos de las cornisas salientes intermedias que, además, indican la superposición de temas arquitectónicos por gravedad. Su empleo en este estilo sería otra causa de dualidad en la composición. La concepción del Art Nouveau en su expresión visible, por tanto y según nuestro entender, es en principio cohesiva, como lo fue el arte clásico musulmán, pero no es un plagio.

Por esta senda ya comenzada no abrigamos ahora duda alguna —como las abrigábamos diez años atrás en nuestro discurso leído ante el Cuarto Congreso Internacional de Arquitectos, celebrado en Chicago— de que el clasicismo arquitectónico racional dentro de la construcción cohesiva se realizará en el presente como una de las aspiraciones, si se quiere, de la laboriosa época de transición que ha atravesado por tantos siglos la arquitectura.

Muchos dudarán que la mera introducción de nuevos elementos —hierro y cemento— en la función constructiva pueda ser causa suficiente para dar nacimiento a una nueva era de la arquitectura e iniciar por consiguiente el principio

del fin del gran paréntesis de la época de transición inaugurada con la aparición del Renacimiento, que siguió a la decadencia del gótico. Los críticos debieran fijarse en el siguiente hecho. Desde las más remotas edades hasta nuestros días, el hombre sólo ha inventado tres estilos típicos de construcción admitidos por la Estética o Filosofía del Arte. A cada aparición de procedimientos de construcción nuevos y radicales le ha seguido siempre un estilo nuevo y original.

El primero de estos tres estilos típicos tiene su origen en Egipto. Lo desarrollaron los egipcios, asirios, etruscos y griegos durante muchos siglos. Alcanzó su máximo desarrollo en el último de dicho pueblos. Los griegos practicaban esta construcción por gravedad y llegaron a alcanzar la expresión artística más elevada.

El arte romano que le sucedió era una invención puramente constructiva y originó el segundo estilo típico. La construcción de fábrica alcanzó gran desarrollo, aunque un tanto apartada de su naturaleza genuina, que es la de trabajar por gravedad. Mas, como ya he dicho, su invención constructiva estaba revestida o exteriorizada con el ropaje artístico tomado del arte griego. Por esta razón el arte romano fue un arte dual. Su construcción o arquitectura construida era una cosa y otra diferente su revestimiento o arquitectura visible. La construcción romana tuvo un largo desarrollo, durante el cual se vivieron acontecimientos como la abolición de la esclavitud o la caída del Imperio. Las influencias que le llegaron de la construcción oriental la condujeron a una perfección relativa. Sólo se aseguró la sanción estética cuando obtuvo la fusión de su sistema constructivo con la genuina representación filosófica exterior. Esta fusión se alcanzó en la época gótica. Entonces fue cuando se constituyó el segundo estilo típico de construcción dentro de los que admiten la Estética. Todas las series de estilos durante esta época, tales como el Románico o el Bizantino fueron estilos de transición, estilos intermediarios, considerados estéticamente.

El segundo estilo típico apareció en el periodo gótico. Este estilo decoraba a la vez que construía. Su construcción por gravedad se exteriorizó de manera notable por medio de los baquetones de las columnas y los arbotantes. Desaparecieron las masas revestidas en su exhibición ostentosa. Durante el esplendor del gótico, y bajo la influencia de la arquitectura árabe del sureste de Europa (Granada, Córdoba, Sevilla), se generó el estilo mudéjar como arquitectura autodecorativa. Un ejemplo de la misma es el hermoso minarete-campanario de la catedral de

Sevilla. La parte superior de La Giralda se construyó mucho después. Otros ejemplos los encontramos en las catedrales de Teruel, Zaragoza y otros varios edificios del mismo carácter. Son construcciones notables esencialmente de ladrillo y piedra vistos. Este estilo es y será uno de los más típicos ejemplos de construcción de carácter decorativo propio dentro del sistema romano. Por eso se admite como uno de los estilos clásicos arquitectónicos, paralelo al arte griego, dentro de la construcción cohesiva.

La decadencia del gótico y la consiguiente aparición del Renacimiento fue paralela a la segunda época de transición hasta nuestro tiempo. El Renacimiento, falto de razones de construcción propias asumió los mismos defectos del estilo romano. Es, con mayor motivo, un estilo de transición, con la sola diferencia de que tiene conciencia de su libre procedimiento con la sanción del cristianismo. Repite el ritmo hasta lo infinito, superpone o mezcla estilos austeros o floridos, sin otro límite que la mayor o menor fluencia de concepción puramente metafísica. Todos estos estilos intermedios, desde el principio del Renacimiento hasta hoy —los renacimientos francés, alemán, inglés y español, lo mismo que el neogriego y el colonial— han sido variaciones sobre el mismo tema, y por tanto, estilos de transición tratados con más o menos talento y arte.

El tercer estilo típico de construcción es una combinación de materiales perecederos y duraderos. Esta construcción combina los materiales indicados para trabajar a compresión con los más propios para la tracción. En una palabra, la combinación de fábrica y hierro —o hierro y fábrica, de acuerdo con la proporción relativa entre ambos elementos— es el último estilo típico de construcción inventado por el hombre. El límite que puede determinar si la construcción compleja u orgánica actual está o no dentro de la función estética, es la mayor o menor proporción de fábrica noble o visible —que construye y protege— sobre el esqueleto de hierro que actúa como un auxiliar y refuerzo. Hay que tener presente, como se ha repetido tantas veces, que la fábrica es y será siempre el medio más noble de expresión arquitectónica y de construcción decorativa. El hierro no puede ser ni nunca será noble, puesto que tiene que estar cubierto, pintado o protegido. Por todo esto, saludamos la aparición del franco y noble estilo de fábrica que construye, protege y decora, ya sea en obras interiores o exteriores. Este es el *desiderátum*, el objetivo real y tangible de la Arquitectura.

Para realizar este ideal se necesitan artesanos inteligentes. Por todo lo que llevamos dicho, y teniendo en cuenta las organizaciones del trabajo, puede decirse que con el objeto de emplear los selectos materiales actuales, a fin de emplearlos de manera útil y conveniente, hay que procurarse artesanos experimentados en su uso y manejo. Sólo se puede asegurar la disponibilidad de peritos o artesanos ejercitados con la educación necesaria para tal propósito. Las sociedades técnicas, los arquitectos e ingenieros debieran convencerse, con el objeto de obtener el resultado que desean en las construcciones, que tienen que depender de los ejecutantes, como por ejemplo sucede con el compositor de una sinfonía, que tiene que contar con los músicos. De otro modo la obra no puede o no debe ejecutarse. Esta deficiencia es la que lamentan los periódicos profesionales, clamando por que se le ponga remedio.

Para que el artesano actual pueda usar materiales modernos debe educarse en una escuela técnica, a semejanza del músico profesional, según indicamos en los *Prolegómenos*. Como hemos puntualizado ahí, no es difícil. Bastaría que se agregara una sección práctica en las academias, que comprenda desde la albañilería hasta la escultura, y que no perjudicase en modo alguno a los alumnos de estas prácticas. Así se identificarían con los materiales y medios que el arte emplea para su expresión. Por esto nos referimos a lo que se dijo en aquella obra, a la espera de que el tiempo y las necesidades puedan justificar su fundación, principalmente en las escuelas de Arquitectura, y en su propia defensa, si desean tener razón de existir, y no ser aniquiladas o absorbidas por las escuelas puramente técnico-mecánicas.

# Apéndice documental

## 1. Extracto de artículo en el *American Architect* (23 de junio de 1904)

La rivalidad entre el llamado sistema estándar de forjados incombustibles, en el que se usan dovelas de terracota, que forman arcos planos entre las vigas, y los diversos sistemas de hormigón armado, es hoy tan agria, que podemo herir cualquier sensibilidad al decir que últimamente ha habido varios fracasos en forjados de hormigón armado de los que los arquitectos debieran sacar escarmiento. Puede asegurarse que toda construcción mala es peligrosa fueren los que fueren lo materiales en ella empleados. Hemos visto algunos forjados incombustibles del sistema estándar malos y peligrosos. Pero bajo las condiciones actuales, los forjados de hormigón tienen más posibilidades de ser mal fabricados que los de la construcción modelo.

El uso de arcos de dovelas para forjados está tan generalizado que cualquier albañil sabe cómo han de colocarse, pero son muy pocos los expertos entre los operarios. Hasta el mismo cemento Portland lo usan albañiles que sólo comprenden vagamente sus cualidades. Como todo arquitecto sabe, el 90% de los operarios que manejan el cemento, si pueden escapar a la inspección, machacan el material endurecido que ha quedado en las cubas del día anterior, lo mezclan con agua y lo usan, ignorando completamente el hecho de que tendría el mismo valor que el barro vulgar. Son pocos los capataces que subrepticiamente no se entreguen a esta práctica. No debe extrañar el que individuos que consideran de este modo el cemento Portland sean declaradamente inútiles para fabricar hormigón, y que se producen continuos hundimientos en forjados de dicho material. Esto puede ocurrir por mezclar demasiada agua con una parte de hormigón, demasiada arena con otra parte, por usar piedras muy grandes o no mezclar bien ninguno de los ma-

teriales, por quebrar cemento que ha empezado a fraguar, por dejar que se hiele el hormigón, o aún por cualquier otro rasgo de torpeza que sería criminal si la ignorancia universal respecto de las propiedades del material no sirvieran un tanto de excusa.

Recordamos los días en que constructores especuladores hacían cimientos supuestamente de hormigón. Para ello llenaban una zanja con guijas secas y extendían arena después. Después, se vaciaban algunos barriles de cemento Portland sobre todo ello y, con una manguera, se hacía la «mezcla». El procedimiento correcto despertó gran interés entre los albañiles de la vecindad, que nunca se cansaron de hacer burla; primero de la idea de hacer hormigón con sólo una décima parte de cemento, luego de la ridícula precaución que exigía que la arena y las guijas se midiesen por barriles y el agua por galones, las guijas se lavasen antes de emplearse, y que todo se debiese llenar a cortos intervalos. Cuando se terminó el hormigón, y trataron de romperlo en sus bordes, su opinión cambió. Hemos tenido la satisfacción de oír que nuestro método —el método técnico que estábamos usando en una obra cerca— se estaba imitando en otro edificio nuevo. Al visitar el lugar encontramos que la imitación consistía en mezclar algo de cemento, arena y guijarros en una proporción que ni aun el que hacía la mezcla probablemente sabía cual era. Echaban la mezcla en hoyos abiertos al lado de los cimientos que se trataban de levantar. Al inquirir cuál era la supuesta ventaja de este procedimiento, nos dijeron que el hormigón al llegar al fondo de los hoyos se «adhería» a la cara del cimiento evitando que se fijase fuera de su posición. Es probable que el inventor de esta fórmula hasta se enorgullezca de su extenso conocimiento de la fabricación y empleo del hormigón. Habría pocos albañiles que no le apoyasen en sus pretensiones.

La consecuencia de esta falta de comprensión por parte de los trabajadores, incluso de los rudimentos de la ciencia de la mezcla y el uso del hormigón, es evidente, no sólo en los fracasos de muros y forjados de dicho material, sino en el esponjoso, mal mezclado y agrietado hormigón de muchos forjados que todavía existen, con gran sorpresa de los peritos que los examinan.

## 2. Datos referentes a la construcción de hormigón armado con acero En *The Engeenering Record* (6 de febrero de 1904)

La importancia de la construcción de hormigón armado con acero y de las condiciones singulares que afectan a su estado actual entre los ingenieros son dignas de comentarse, particularmente a causa de un artículo de un apreciado corresponsal que indica el gran temor por la actitud del *Engineering Record* con respecto a dichas materias. Nos parece oportuno por lo tanto expresar que hasta el presente la mayor parte de los ingenieros que han concedido mayor atención a la construcción de hormigón y acero, están interesados ya en contratar, ya en abastecer el material que se emplea, como refuerzos de acero para

las construcciones de hormigón. Cualquiera que esté familiarizado con algunos trabajos de esta naturaleza recientemente ejecutados sabe que hay personas ocupadas en este tipo de construcción de edificios y puentes que no tienen los conocimientos necesarios para emprender esa tarea. Por otra parte, hay muchos que comprenden que no pueden arriesgar su reputación dibujando estructuras que tienen elementos deficientes. Es justo recordar que en nuestros días no hay ningún procedimiento aceptado para el proyecto de esta clase de obras. El *Engineering Record* prefiere los métodos expuestos en la última edición del libro *Materials of Engineering* del profesor Burr. Sin embargo, es perfectamente equitativo reconocer que algunos ingenieros de larga experiencia prefieren emplear otros métodos de proyecto. Con los datos ahora presentes, el cálculo correcto de edificios importantes de hormigón armado demanda un conocimiento completo de teoría de estructuras y un juicio ejercitado. El ingeniero que posea estas condiciones puede estar seguro de producir resultados satisfactorios, fuere cual fuere la fórmula que emplee; mientras que el que no las posea corre riesgos enormes.

Esta es la opinión sostenida por el *Engineering Record.* No obstante, es evidente que sus columnas están abiertas para una discusión de la teoría y práctica de la construcción de hormigón armado con acero, que se conduzca de la mejor manera y con argumentación elevada. No establece ninguna diferencia sobre quien defiende los principios de proyecto: un profesor ingeniero profesional, un fabricante de armaduras de acero o un contratista de obras de hormigón armado. Si esta clase de lectores se decide a enviar una reseña de los experimentos que han practicado, las estructuras que han construido o las teorías que mantienen, siempre se concederá tanto espacio a su colaboración como el director la estime digna de los lectores. Pero no hay espacio en ésta para artículos de otro orden. Las declaraciones fastidiosas, sin pruebas, de que un colaborador está equivocado, las alusiones sarcásticas a su saber o experiencia, las peticiones a favor de cualquier sistema de proyecto que no vayan acompañadas de una discusión mesurada acerca de las ventajas del mismo, no son útiles para nadie. Esta declaración parece necesaria a causa de las condiciones peculiares de la industria del hormigón armado en la actualidad. Ya han ocurrido numerosos fracasos en este género de construcción, y todavía acontecerán más, debido a que no se ha calculado o ejecutado bien la obra. Los datos más importantes acerca de este asunto probablemente los poseen los diversos interesados que construyen dichas obras. Ninguna razón social o individual puede tener más que una parte reducida de la información que debe aprovechar a todos, si es que el hormigón armado con acero ha de salir sano y salvo en su periodo de prueba. En vez de disputar mutuamente y perjudicar el negocio que tratan de encumbrar, los interesados económicamente en el uso del hormigón armado deberían analizar sus datos, así como toda la información importante de que disponen, dado su interés. Así contribuirán con sus estudios a establecer el buen nombre del hormigón armado.

La construcción que lleva este nombre corre hoy más peligro a causa de los que emprenden obras sin importancia que por los que se esfuerzan en introducir nuevos métodos para aplicar el refuerzo de acero. Hay muchos contratistas generales excelentes que creen que la clase de hormigón a la que están acostumbrados a emplear en muros de contención, en la parte baja de los edificios y en la solera de los pavimentos es un hormigón adecuado para su unión con el acero. Ambos materiales son completamente diferentes, y la falta de reconocimiento de este hecho es lo que conduce a graves problemas.

## 3. Extracto de la conferencia pronunciada por el autor en el 4º Congreso Internacional de 1893

Diversas investigaciones nos han convencido de que el pueblo más remoto que salió triunfante en adelantos e invenciones en su sistema de construcción fue el persa. Por esto los persas deben considerarse como los padres del sistema cohesivo de construcción. No hay duda de que en tiempo de la dinastía de los Aqueménidas que termina con Darío, fue la era del verdadero progreso en los estribos para cúpulas y arcos. (Aitchison, *Byzantine Architecture*). De dicha civilización arranca la práctica del sistema empleado por griegos y romanos, puesto que el Panteón de Roma, lo mismo que las cúpulas y bóvedas de las Termas de Caracalla, son modelos de edificios cuya idea se tomó de los antiguos monumentos persas con los que deben haber estado familiarizados aquellos arquitectos o haber tenido algún conocimiento de ellos.

Está probado que los bizantinos necesitaron conocer el sistema cuando comenzaron en Bizancio por los edificios pobres del tiempo de Constantino (Zósimo, libro 2), por falta de arquitectos hábiles y entendidos y trabajadores que les asistiesen en sus primeros intentos. Por esta razón ningún edificio de la época de Constantino ha durado hasta hoy en el antiguo Bizancio.

La primitiva arquitectura cohesiva, que comenzó a adquirir carácter en los monumentos persas, se desarrolló muy bien gracias a los adelantos constructivos introducidos por los romanos durante el imperio de Augusto y los siguientes emperadores. Los días de esplendor de los bizantinos constituyen el periodo más brillante de la fábrica, desde los sencillos muros hasta los sistemas de estribo de las arrogantes cúpulas, con sus tímpanos, sus nichos, sus pechinas y bóvedas de horno. Su anhelo fue siempre alcanzar la condición de mínimo peso y espacio ocupado por los muros con relación al espacio total que cubre la estructura. Luego, los arquitectos de la piedra tallada, conscientes de su independencia y del valor de su tiempo, tomaron la dirección del reinado de la época de la piedra más ricamente labrada y tallada hasta lo imposible, preparaban el Renacimiento, pasando por la arquitectura gótica occidental.

Pero, ¿qué han dejado los persas, romanos y bizantinos? Durante todos esos 2.500 años en que la construcción cohesiva estaba en estado embrionario, todos los adelantos y

las invenciones se dirigieron, según hemos dicho, con la idea de obtener el máximo de resistencia con el mínimo peso y razón de las masas de los materiales comparadas con el espacio cubierto. En el primer ensayo de la mejor de sus construcciones —Santa Sofía— no triunfaron porque el edificio se derrumbó por los defectos de su construcción, agravados por la falta de uniformidad en el plan de la estructura, pues la fábrica estaba mezclada con tirantes de madera. Estos tirantes son los tendones de la construcción cohesiva durante la construcción, y también después de que la fábrica esté concluida y fraguada. Se expusieron y trataron de tal manera, que todos esos edificios fueron de corta duración. El peligro era constante, según lo evidencia el que ninguno queda en pie, como dejamos dicho, incluyendo la primera Santa Sofía, habiéndose destruido durante una de aquellas conflagraciones terribles y frecuentes, cuando las pérdidas de vidas se contaban en Bizancio por miles, y que destruyeron todos los edificios importantes de esa época en Constantinopla.

Cuarenta días después de esta horrible calamidad, Justiniano y Teodora levantaron nuevos edificios bajo la dirección de los arquitectos asiático-griegos Anthemio e Isidoro, con mejores concepciones y resultados, por cuya razón podemos aún admirar varias de estas construcciones, en especial la nueva Santa Sofía. Mas en este segundo intento realizado en la época de Justiniano, si bien lograron lo que Constantino no pudo, aparecieron otros defectos que les obligaron a poner a sus obras maestras nuevos refuerzos, tales como estribos, por donde se ve claramente que no consiguieron darle al sistema cohesivo el carácter espontáneo y estético que los griegos consiguieron respecto al estilo egipcio mediante el sistema de gravedad. Por esta razón, todo este periodo de Bizancio ha pasado a la Historia como una época de transición, y por lo tanto estimamos necesario admitir esta referencia histórica al comparar la mejor época de la construcción cohesiva, con la perfección artística y mecánica de la era griega.

Es cierto que adelantar y elevar al clasicismo la construcción de piedra de los egipcios —o construcción por gravedad— es «aparentemente» más fácil que obtener los mismos resultados en la primitiva construcción persa —base del sistema cohesivo—, aunque habían transcurrido varios siglos entre los primeros faraones y la época de Pericles. Esto evidencia que la perfección en la arquitectura comprende un buen número de años. La comparación entre las obras del sistema de gravedad de la arquitectura egipcia y la griega —y referimos ambas a la concepción constructiva y artística de aquellos—, a través de la época asiria, puede hacerse igualmente entre la arquitectura persa, dentro del sistema cohesivo, pasando por los periodos bizantino y moderno a la construcción cohesiva clásica, para la cual fue tan fecunda en grandes y novísimos elementos de éxito la última década del siglo XIX. En realidad somos nuevos con respecto al progreso en el arte de construir dentro de la construcción cohesiva, como era el sistema de gravedad en el periodo egipcio y asirio, antes de la gran era del arte griego. En cuanto a la construcción cohesiva, estamos muy lejos de alcanzar el paralelo de los griegos en el sistema de gravedad.

La arquitectura egipcia, con su sistema de construir por gravedad, puede compararse a la edad de piedra en la formación de la Tierra: la construcción por gravedad carece de vida individual, la piedra se extrae de la cantera y se coloca muerta sobre otra en la construcción. El método egipcio supone el reposo tanto de las partes de apoyo como de las sostenidas. En la construcción persa, los elementos sustentantes, lo mismo que los sostenidos, tienen y deben tener constante trabajo de propio atirantamiento como primer principio de su existencia. Elegir y agrupar los materiales indispensables, poner en ellos los elementos de vida y protección natural, es uno de los capítulos más importantes del sistema cohesivo que debe conocer el arquitecto. Todas estas nuevas condiciones y complicados elementos de construcción, necesarios a la construcción cohesiva, no podían haberse resuelto en el estado científico de aquel antiquísimo periodo. Por esto, la era más avanzada en la construcción cohesiva, es decir, el periodo bizantino, fue una época de transición. Estos edificios, aunque arquitectónicos en sus líneas, eran semejantes a cierto ejemplar del reino animal, cuyo esqueleto no está aún bien articulado, y que no se corresponde todavía a un cuerpo bien desarrollado, armonioso y perfecto como por ejemplo el hombre. Éste, aunque construido con formas carnales, bien modeladas y distribuidas, que le comunican belleza, tiene sin embargo el esqueleto interior y los tendones que con unión de los diversos sistemas que lo forman, dan al organismo el máximo de fuerza y capacidad con el mínimo peso.

Los materiales cohesivos de la Antigüedad y de la Edad Media eran muy lentos. Cuando no podían encontrar las cales hidráulicas naturales empleaban cales convertidas en hidráulicas para mejorar su condición de cohesividad y rápida consolidación hasta cierto grado. Para ello entremezclaban una cantidad de arcilla cocida que daba al mortero de cal la condición de un silicato de alúmina. Pero no es difícil imaginar las inmensas dificultades y el peligro constante si se atiende a la construcción de cúpulas pesadísimas, al contar sólo con materiales de un fraguado tan pobre. La «piedra pómez» (lava del Vesubio) y la cal puzolana, que fue tal vez la base del cemento y del mortero romanos, no era más rápida en fraguar, y de aquí la necesidad de esos enormes espesores, cimbras enormes, y periodos muy largos de tiempo necesarios para obtener la resistencia indispensable para que sean aptos para la construcción.

Los persas evitaban el uso de cimbras para levantar sus cúpulas cónicas con la colocación de hojas de ladrillo siguiendo el trazado en cada capa. Se daba un poco de tiempo antes de colocar la siguiente para lograr algo de cohesión. A continuación se seguía avanzando con el mismo método. Esto conllevaba siempre el costo de una gran suma de tiempo, que era su único recurso. Sin embargo, en las cúpulas romanas, aunque reforzadas y sostenidas en gran parte mediante algunas hojas de ladrillos puestos de plano, el material se colocaba con el mismo mortero aéreo o de cal grasa, según puede verse todavía en algunos ejemplos. No era suficiente evitar la cimbra tan pesada, porque ese material que

ahora constituye las cúpulas es en la actualidad sólido y resistente después de siglos de asimilación y transformación de las materias componentes por la acción química y del tiempo.

Hay otra época notable dentro del desarrollo de la construcción cohesiva que deseamos se nos permita registrar en esta ocasión, en vista de su influencia sobre la arquitectura moderna de este país. La arquitectura española y la hispano-musulmana, representaban la arquitectura del extremo occidental, conocida en el comienzo del mundo cristiano. El edicto imperial de Constantino, que declaraba el cristianismo como religión del Estado a la vez que transfería la capital del Imperio romano a Bizancio, obligó a los judíos y a otras religiones a emigrar de la Europa oriental y del Asia occidental por primera vez después de Cristo. Esto dio quizás ocasión a las últimas invasiones de los árabes y musulmanes. El principal atractivo para los emigrantes, principalmente judíos, fue España, por su clima, riquezas y sus ya relativamente extensas relaciones comerciales con el Imperio griego. Estas relaciones, durante el periodo bizantino dieron lugar a legendarios nombres como el de Roger de Lauria, entre otros. También fue amplia la tolerancia religiosa, según acontece siempre en los pueblos jóvenes. Se construyeron iglesias y catedrales románicas en España al mismo tiempo que se toleraban las sinagogas. Estos edificios eran de notable carácter constructivo. Es motivo de congratulación que los arquitectos americanos, en sus juicios imparciales de artistas antes que historiadores, hayan reivindicado para la Historia del Arte español una página que fue erróneamente falseada por los historiadores de la Europa septentrional. Por fortuna, cuando la Historia se escribe con monumentos arquitectónicos no se puede alterar por completo.

El carácter de la mayor parte de los antiguos modelos bizantinos y romanos en España fue de construcción monolítica hecha de material conglomerado. Muchos muros y forjados semejantes a otros ejemplos relativamente modernos eran de piedra y hormigón y otros de hormigón solamente. Para los segundos parece que se usaban moldes o cimbras muy robustas, que daban al material una apariencia exterior semejante a masas fundidas. Esto se puede ver en las ruinas de muros y bóvedas que se conservan y que demuestran perfectamente su construcción. Cerca de la ciudad de Barcelona, entre el pueblo de San Andrés y el río Besòs, hemos visto hace treinta años las ruinas de una construcción monolítica muy importante de esta clase. Se construyeron algunas cúpulas de piedra y se rellenaron con el hormigón al que nos hemos referido, tal vez sin cimbras porque es piedra más pequeña sin labrar. Todavía se practica la construcción de cúpulas pequeñas de esa clase. Solamente se emplea un listón de madera como radio y se va cerrando cada vez siguiendo los paralelos, eliminando la necesidad de una cimbra.

La construcción árabe era la misma. Los musulmanes llegaron al clasicismo en su época de más esplendor por su noble manera de tratar todo elemento constructivo tanto de madera —aplicado a forjados planos, armaduras de cubierta o puertas— como de már-

mol, yeso o cerámica, que utilizaron en su época clásica, de estilos románticos como decoración interior. La madera de los mocárabes en las decoraciones constructivas interiores de sus cúpulas, techos y bóvedas es una contradicción palpable y una parodia de las estalactitas naturales. Esto prueba que no estaban al mismo nivel de progreso en la construcción como sus vecinos contemporáneos del Norte y el Este.

Desgraciadamente el actual sistema de construcción de esqueleto de acero es el extremo opuesto de la construcción bizantina por la carencia de verdadera construcción arquitectónica. En ésta todo era carne; en aquélla, todo hueso. La una es el esqueleto humano sólo envuelto en la piel, y sin más vida artística y más alma que las que puede dar un cerebro mecánico y positivista —frío cálculo y resultado neuro-físico, que jamás pueden ser arquitectura, y que está en su infancia por falta de desarrollo o de objetivo artístico. Tal es el carácter que se manifiesta al término del siglo XIX de la que puede llamarse arquitectura «fin de siglo». Los ingenieros de esa época han traído nuevos elementos de originalidad al arquitecto observador. Esto es un hecho, mas también es evidente que esos nuevos elementos son, según hemos dicho, el exacto carácter arquitectónico de esa época, que por tal motivo pasaría a la historia como una época de transición, y semejante al periodo bizantino.

Pero aún tenemos que agregar algo más. ¿No tenemos ya lo que los romanos y bizantinos necesitaban, esto es, la construcción de armadura de acero, con tirantes de acero, o necesitamos lo que tenían, es decir, la carne, la fábrica artística tratada de una manera arquitectónica? Esta combinación de esqueleto de acero, junto con los elementos masivos dados por los fabricantes de materiales de construcción, cemento Portland, por ejemplo, y otros materiales, han ido acumulando adelantos inconscientemente hasta cerrar el siglo XIX en beneficio acaso de los arquitectos de la nueva era. ¿Serán, si llegan a desarrollarse con inteligencia, el comienzo de la construcción cohesiva clásica, como lo fue la era griega para la construcción clásica por gravedad?

Conforme ya hemos expresado, el arquitecto no podía dar carácter al esqueleto seco y sin vida con esa ligera piel sin tener carne. Con esa ausencia del alma se produce la desgraciada fisonomía en detrimento de toda verdadera obra arquitectónica, y esto es cierto respecto de los edificios de esqueleto de acero cubiertos con la pobre corteza que llaman incombustible, la cual, si es incombustible en sí misma, no lo es hasta el extremo de proteger y comunicar belleza al esqueleto, ni, pongamos por caso, estaría protegido o expresaría belleza nuestro admirable sistema animal, si tuviésemos sólo la piel y los nervios sobre los huesos. Estaríamos realmente muy graciosos si nos pereciésemos a las exangües momias egipcias.

Nadie puede admitir que el hombre, con los sistemas óseo y nervioso, vísceras y sentidos —partes esenciales de la vida latente—, no tiene necesidad de musculatura. Sabemos que el hombre podría vivir, mas no podría resistir a los elementos naturales. Idéntico

es el caso con las construcciones de esqueleto que están revestidas con ese endeble abrigo mecánico que llaman incombustible, con el que la construcción de esqueleto no resiste ni podría resistir el fuego. Esto es justamente lo que uno de vuestros más acreditados y prominentes ingenieros, W. Sooy Smith, que es al mismo tiempo un constructor de edificios de hierro, con su incisivo lenguaje ha enfatizado con muchísima razón: la construcción de esqueleto es una imperfección arquitectónica y una amenaza contra la cual algo debe emprenderse. Pero no queremos decir que lo que se necesita en el esqueleto de acero es cubrirlo con el material llamado incombustible, en el sentido de que el meritísimo ingeniero ya mencionado no admite como protector del hierro o incombustible, que, podemos añadir, no tiene en absoluto ninguna forma arquitectónica, ni menos queremos decir que a fin de corregir la forma y procurar apariencia arquitectónica, se emplee otra clase de incombustible que consiste en alambrados de diferentes modelos, dando tal vez líneas de aspecto arquitectónico al cubrirlo con yeso u otro material vaciado y dejando huecos que permitan una oxidación lenta. Puede llamarse falsa a esta construcción. Es como si la Naturaleza hubiera cubierto nuestros huesos y nuestro sistema nervioso sólo con la piel, según antes expresamos, pero dando además formas ficticiamente mórbidas como las de una muñeca, de suerte que atendiese solamente a las líneas artísticas exteriores. Los huesos y el sistema nervioso no estarían mejor protegidos que en el primero caso, por el contrario, se hallarían más expuestos, ya que la monstruosidad es falsa y degradante. Esto es lo que acontece a todos los edificios que parodian a los edificios clásicos, cuando la madera, el latón y materiales de la misma clase constituyen la forma artística falsa. La verdadera construcción arquitectónica, la natural y legítima construcción, debe ser exactamente como la Madre Naturaleza nos demuestra en la más perfecta de sus obras: el hombre.

La antigua construcción cohesiva nos ha dado valiosos elementos de forma constructiva, es decir, materiales de fábrica y nuevas formas constructivas de fábrica. Los progresos de la ingeniería en la actualidad nos han proporcionado también nuevos materiales, perfeccionando lo que Roma y Bizancio hicieron sobre este punto. ¿Por qué el arquitecto de nuestros días no ha de utilizar juntamente todos estos elementos de construcción y satisfacer lo que exigen las obras de ingeniería, según lo ha explicado Sooy Smith, recomendando con tanta eficacia que debe hacerse algún esfuerzo para proteger las construcciones de esqueleto? Esto sólo se conseguirá si se da a la fábrica esa noble función, si se reduce el hierro a su límite racional. Así se logrará satisfacer lo concebido en los no menos ilustres pensamientos de Aitchison, que dice: «Aunque el hierro ha sido pródigamente empleado en varias construcciones, no es probable que ocupe el lugar de materiales que se han apreciado desde la antigüedad».

## 4. «Futuros Desastres». Artículo en *The Brick Builder* (marzo de 1904)

La última década ha presenciado un aumento extraordinario de edificios altos de oficinas. El número de esas estructuras en la ciudad de Boston ha pasado del doble en dicho periodo. En Nueva York ha aumentado cerca del quíntuplo, y en otras ciudades la progresión en el número de las estructuras elevadas supuestas de primer orden ha sido enorme. A veces ha parecido como si no pudiésemos construir lo bastante rápido y frecuente para satisfacer la demanda. Un espíritu contagioso nos solicita constantemente y con urgencia edificios más grandes y elevados, construidos con rapidez, de modo que los esfuerzos de los antiguos arquitectos y contratistas, que ha puesto su mano en cada parte de la obra, no fueron suficientes para encontrar demanda, y compañías de bienes raíces, capaces de ponerlo todo a flote, desde un bote a un navío de guerra, y sindicatos de constructores especuladores dispuestos a cubrir la tierra con gigantescos edificios de hierro, surgen a la vida pública con tan rápida fortuna que es difícil explicárselo.

Estamos empezando, en nuestra opinión, a pagar el precio de esta última expansión. El hundimiento del Hotel Darlington en Nueva York, el horrible fuego de Rochester, cuando todo el frente de un edificio se desplomó sobre la calle, y otros accidentes que se comentan por lo bajo entre contratistas y constructores, pero que no han aparecido todavía impresas en ninguna parte, son, a nuestros ojos, un precio espantoso que hemos tenido que pagar por el desarrollo extraordinario de la construcción de esqueleto de acero durante la década que acaba de transcurrir. Estos desastres y muchos de nuestros fuegos en los llamados edificios incombustibles no son sino los precursores de una tremenda serie de fracasos en edificios de acero. Estos fracasos deben cargarse directamente a nuestra extraordinaria vehemencia y deseo de construir rápidamente.

Se puede afirmar con certeza que una gran proporción de estos edificios de esqueleto de acero que se han erigido en nuestras grandes ciudades durante los pasados cinco años, no sólo son de calidad muy inferior al promedio de los cinco años anteriores, sino que han sido construidos de una manera tan abandonada y peligrosa, que sólo su buena suerte ha preservado a algunos de ellos de venirse al suelo antes de que se terminasen. No somos alarmistas ni formulamos augurios pesimistas acerca del porvenir. Cuando la armadura de acero hizo su primera aparición entre nosotros se consideró como un problema manejado por especialistas que conocían las dificultades que tenían que vencer. Todavía es un problema para el especialista, pero las empresas constructoras, con sus arquitectos e ingenieros contratados por año, los constructores desalmados que hipotecan y venden con rapidez, no tienen empleo para un experto. El resultado son esos accidentes inevitables como los ocurridos en Nueva York. Hay muchos edificios de estructura de acero bien construidos, duraderos y de primer orden en todas nuestras ciudades. Desgraciadamente están clasificados por la opinión pública junto con las construcciones engañosas

que comienzan a formar la mayoría. Sólo podemos esperar que, como los desastres alcanzan inevitablemente a todos esos edificios desgraciados surgidos a un tiempo, ocurran de tal manera que al menos dejen de ser considerados por la comunidad como edificios de primer orden.

Existen dos engaños populares actualmente: uno parece ser que toda gran estructura que es presa del fuego es una estructura incombustible; el segundo es que todo edificio con estructura de acero debe por fuerza estar bien construido. Hay que reprocharle ambos engaños a la prensa popular.

# Notas

**Ensayo sobre la construcción cohesiva**

1. Todavía hoy, a pesar del progreso en la fabricación del cemento Portland y las grandes existencias en el mercado, debemos tomar todas las precauciones posibles respecto a la calidad del cemento que empleamos.
2. Seguramente éstos últimos no sabían que en España el 95% de los arquitectos y el 99% de los constructores no conocían o posiblemente no habían oído hablar nunca sobre el sistema; que lo mismo aparentemente ocurría en Italia, y que los forjados resistentes al fuego habituales en ambos países en edificios importantes se empleaban mucho antes de que también se usaran aquí los arcos de rasillas y las vigas de hierro, utilizándose los arcos de rasillas solamente en algunos estados, para luces pequeñas y en construcciones comunes y económicas.
3. Ver D. Daniels, *General History of Architecture*.
4. Ibídem.
5. Ware, Samuel. *Tracts on Vaults and Bridges.* Londres: 1822.
6. [La cita latina aparece también en el tratado de Rondelet. Traducida de la edición italiana, dice: «Dejó las magníficas termas que llevan su nombre; en ellas se encuentra la sala *Soleare*, cuya estructura parece a los arquitectos inimitable. La estructura de toda su bóveda está formada de una malla de barras de bronce y tiene una luz tan grande que los mecánicos niegan su estabilidad». (J. Rondelet. *Trattato teorico e pratico dull'arte di Edificare*. Mantua: 1834. Vol. 3, Parte 2, p. 102.) N. del E.]
7. Véase Coste, arquitecto, *Voyages en Perse*, en los años 1840 y 1841. [E. Flandin y P. Coste. *Voyage en Perse de MM. Eugène Flandin, peintre et Pascal Coste, architecte pendant les années 1840 et 1841*...publié... sous la direction d'une commission composée de MM. Burnouf, Lebas et Leclère. París: Gide et J. Baudry, 1843. N. del E.]

8. [El ingeniero francés Louis-Joseph Vicat (1786-1861) fue el primero en estudiar científicamente la composición y propiedades de los morteros. Publicó numerosas contribuciones. Quizá la más conocida: *Résumé des connaissances positives actuelles sur les qualités, le choix et la convenance réciproque des matériaux propres à la fabrication des mortiers et ciments calcaires, suivi de notes et tableaux d'expériences justificatives*. París: F. Didot, 1828. N. del E.]
9. [La fórmula corresponde a lal empuje horizontal de un arco parabólico sometido a una carga uniformemente repartida $q$, de manera que la carga total $P = q\ l$ (véase *Introducción*). En esta y en las siguientes fórmulas se ha empleado la notación moderna para facilitar su comprensión. N. del E.]
10. [Se refiere al libro del ingeniero francés Dejardin, *Routine de l´etablissement des voutes ou recueil de formules pratiques et de tables déterminant a priori et d´une maniére élémentaire le tracé, les dimensions d´équilibre et le métrage des Voûtes d´une espèce quelconque.* 20 ed. París: Dalmont et Dunod, 1860. La parte correspondiente a las fórmulas para el espesor de las bóvedas, pp. 46–54. Guastavino expone la fórmula de forma confusa; se ha simplificado para facilitar la comprensión. N. del E.]
11. Un ejemplo de esto es la sección dibujada por los arquitectos Mc Kim, Mead & White para un proyecto de puente en Prospect Park, Brooklyn.
12. Dejardin, op. cit.
13. [Al parecer Guastavino aplica la fórmula de Dejardin para el espesor en la clave ya redondeado a 2 pulgadas ó uno 5 cm. El semiángulo de apertura de un arco rebajado al 10% es de unos 22° y el espesor en la clave sería de 55 mm. N. del E.]
14. Al final de este libro incluimos una tabla donde se tiene en cuenta el momento flector (ver pág. 95).
15. [Guastavino aplica la aproximación de Frézier de que el empuje de una cúpula es aproximadamente la mitad del de un arco del mismo perfil (ver *Introducción*). El espesor será, por tanto la mitad. En el libro original de Guastavino la exposición es extremadamente farragosa y confusa. Como antes, se ha simplificado esta parte del texto para facilitar la comprensión del contenido fundamental. N. del E.]
16. [Lo que sigue pretende ser una demostración matemática de la fórmula del empuje del arco parabólico. La exposición es confusa. Parece que realiza la suma (integral) de los empujes de una carga puntual colocada a intervalos iguales, que es una de las maneas de deducir la fórmula. Quizá Guastavino trata de seguir sus antiguos apuntes de Resistencia de Materiales. En este caso la exposición apenas se ha modificado, para que el lector pueda apreciar las dificultades que encuentra Guastavino para abordar un problema de estática elemental. N. del E.]
17. [Se refiere a la superficie ocupada en planta, como puede verse comparando las figuras 22 y 23. El razonamiento tiende a demostrar la reglas de Frézier de que las cúpulas empujan la mitad. La afirmación no es exacta, pero va a favor de seguridad. De hecho el empuje de la cúpula es, no la mitad, sino entre 2,6 y 3 veces menor que el de la bóveda de cañón análoga (para pequeños espesores). La razón es que los husos presentan, al ser desarrollados en planta una superficie menor que la mitad y, además, el centro de gravedad del huso está mucho más cerca de los arranques que en el arco, debido a su variación de sección. N. del E.]
18. [Por supuesto, las cúpulas tabicadas empujan y Guastavino colocaba siempre un zuncho de hierro para absorber su empuje, como puede verse en los innumerables detalles constructivos que se conservan en el Archivo Guastavino de la Avery Library. Para el

comportamiento de las cúpulas tabicadas ver *Introducción*; para los detalles, véase los muy numerosos reproducidos en el libro *Las bóvedas de Guastavino en América*, ed. por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2001. N. del. E.]

19. Puede también reforzarse por medio de un arco de descarga volteado sobre la viga, arco que se llevará parte de la carga del forjado y lo transmitirá a los muros que conectan las citadas vigas, las cuales trabajarán así conjuntamente con él a tracción. Esta disposición tiene la ventaja de reducir la cantidad de hormigón y, por tanto, el peso sobre los riñones del arco y las vigas.
20. [La forma de la expresión es correcta, pero falta una constante adimensional $\alpha$, que se ha indicado entre corchetes, cuyo valor está entre 0,166 y 0,075. De hecho la resistencia a tracción de la fábrica tabicada, medible en ensayos de laboratorio, no debe tenerse en cuenta. Ver *Introducción*. Guastavino busca explicaciones al hecho de que las bóvedas entre vigas metálicas transmiten parte de la carga a los apoyos. El mecanismo es por formación de arcos de descarga, Fig. 37, como él mismo trata de explicar más adelante. N. del E.]
21. El arco *a b c d* mencionado en la Fig. 35 tendrá, en planta, la forma del paralelogramo limitado por las líneas de tensión AOC y las líneas correspondientes del arco contiguo (Figs. 35 y 37).
22. [Guastavino toma momentos respecto al borde la sección y establece el equilibrio al vuelco. El primer término corresponde al momento estabilizador del peso; el segundo sería la de un material con infinita resistencia a compresión que moviliza toda su resistencia a tracción, con un bloque rectangular de tensiones, al girar alrededor de la arista *a*'. En el libro falta el término entre corchetes. Curiosamente, parece ser una muy tardía aplicación de la teoría (incorrecta) de flexión de Galileo, que pervivió en algunos manuales hasta principios del siglo XIX. (Sobre la historia de las teorías de flexión, ver: J. Heyman, *Análisis de estructuras. Un estudio histórico*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2004.) N. del E.]
23. [Esta parte es prácticamente incomprensible. La primera fórmula da la tensión máxima de tracción (sic) en una ménsula de luz $l/2$ sometida a una carga total $W = q\ (l/2)$, siguiendo de nuevo la incorrecta teoría de flexión de Galileo. La segunda expresa la tensión máxima debida al peso propio *W*' de la ménsula de luz $l/2$. De nuevo, resulta patente su falta de familiaridad con las fórmulas de la Resistencia de Materiales, que debió estudiar en su época de estudiante. N. del E.]
24. No profundizaré más en esta teoría y su aplicación universal en nuevas ideas para la construcción, ya que desborda los límites de este pequeño libro preliminar.
25. Aunque no pertenece al tema, se puede destacar que estos muros y techos tubulares también facilitan la instalación de un sistema de tuberías que conecte cada esquina de la habitación con la estufa o el hogar de calderas, fogones u hornos, con el fin de que pase a través de las llamas, que es una buena manera de transformar el aire impuro. Una solución así se puede utilizar para la ventilación de los edificios docentes; aquellos que estén más interesados en este asunto pueden acudir a los planos y tratados enviados por el autor al Philadelphia Centennial, en «Improving the Healthfulness of Industrial Towns», premiado por vuestro distinguido conciudadano, el General Walker, como Jefe de la Comisión de Premios.
26. [El profesor Ramón Gumá de la ETS de Arquitectura de Barcelona me informa en una comunicación personal de que el primer empleo documentado de las bóvedas tabicadas ocurre en la fábrica «Vapor Vell» del barrio de Sants en Barcelona, construida en-

tre 1846 i 1848. Son bóvedas de dos hojas de rasilla que apoyan sobre vigas de madera soportadas por soportes de fundición. Para más información, véase su tesis doctoral: R. Gumà i Esteve. «Origen i evolució de les tipologies edificatòries i característiques constructives dels edificis de la indústria tèxtil a Catalunya (període 1818-1925)». Universitat Politècnica de Catalunya, 1996. N. del E.]

27. Los muros están construidos con elementos de arcilla; los soportes tienen una forma hueca y se utilizan como chimeneas de ventilación. Las vigas están todas incluidas en los arcos y trabajan a tracción. Se emplean forjados de ladrillos cerámicos muy cocidos, etc., además de columnas protegidas contra el fuego; no hay hierro expuesto. En cada forjado, además del espacio requerido por las necesidades de la fabricación, hay oficinas, almacenes o simples habitaciones, aseos y escaleras protegidas contra los incendios. El edificio está bien iluminado y ventilado, y se adapta a casi todos los tipos de fábrica. Los pisos son de 4,27, 3,96, 3,66 y 4,27 m (14', 13', 12' y 14)', respectivamente, con crujías de 7,62 H 32,31 $m^2$ (25' H 106'). La carga segura es de 0,007 $N/mm^2$ (150 libras/$pie^2$), un mes después de construido; 0,016 $N/mm^2$ (350 libras), seis meses después. El edificio tiene cuatro pisos de altura, de 72,5 m (238 pies) de profundidad y 41 m (134 pies) de anchura, que suman 2.415 $m^2$ (26.000 $pies^2$), y el precio está tomado sobre una cantidad similar. El coste es de 956 centavos/$m^2$ (89 centavos/$pie^2$) para cada planta, incluyendo muros, forjados y construcción de hierro, frente a 806 o 860 centavos/$m^2$ (75 u 80 centavos/$pie^2$) de forjado de madera y cerchas sobre muros.
28. El coste actual está entre 10 y 12 dólares.
29. [No hemos podido localizar el libro al que se refiere Guastavino, pero este tipo de tablas fueron muy populares en los tratados del siglo XIX. Parece que la primera tabla de este tipo fue publicada en la primera edición del tratado de Rondelet: J. Rondelet. *L'art de bâtir*. París: Chez l'Auteur, 1805. Vol. 3, p. 232. N. del E.]
30. [Publicó un libro sobre mecánica aplicada en el que expone la teoría del arco elástico, siguiendo principalmente a los autores alemanes (Weyrauch y Winkler): G. Lanza. *Applied Mechanics*. Nueva York: John Wiley & Sons, 1891. La teoría del arco elástico en pp. 827-842. N. del E.]
31. [En la tabla, aunque no se indica, el valor de las tensiones, calculado al multiplicar el valor de *w* (libras/pie5) por el coeficiente numérico, se obtiene en libra/pulg5. N. del E.]

**Función de la fábrica en la construcción moderna**

1. [A. Choisy. *L'art de bâtir chez les romans.* París: Librairie générale de l'architecture et des travaux publics Ducher et Cie, 1873. En la revista *Brickbuilder* se publicó una traducción íntegra al inglés, que fue apareciendo por entregas a lo largo de cuatro años: A. Choisy, «The Art of Building among the Romans», *Brickbuilder*, 3-7, 1894-1897, pp. (1894) 52, 83, 104, 128, 152, 201, 223, 248; 4 (1895) 28, 52, 74, 97, 143, 164, 186; 5 (1896) 4, 39, 123, 207; 6 (1897) 144, 168, 195, 220, 273. De manera sorpredente, la traducción nunca se publicó en forma de libro, ni tampoco la he visto reseñada en ninguna monografía o artículo sobre Choisy. Existe una edición española: A. Choisy. *El arte de construir en Roma.* (ed. de S. Huerta y F. J. Girón). Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1999. N. del E.]
2. En los últimos siete u ocho años se han introducido grandes mejoras, debido principalmente a la inevitable resistencia que se requiere de los muros para edificios altos y otras obras de fábrica noble, donde los albañiles americanos que colocan las rasillas

y ladrillos han demostrado su aptitud y sus notables cualidades cuando se dirigen correctamente.

3. [Guastavino se refiere al libro: E.-E. Viollet-le-Duc. *Rational Building, being a translation of the article «Construction» in The Dictionnaire Raisonné de l'Architecture Française of M. Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc by George Martin Huss, architect.* New York: Macmillan, 1895. Existe una edición española de este artículo de Viollet-le-Duc: *La construcción medieval.* Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1997. N. del E.]
4. [E.-E. Viollet-le-Duc. *Entretiens sur l'architecture*. París: A. Morel, 1863-1872. N. del E.]
5. Tema 4: Influencia de los procesos de construcción moderna en la forma artística. Tema 7: Influencia de las leyes de construcción en la arquitectura privada. [Se refiere al Sexto Congreso Internacional de Arquitectos de 1904. Las Actas se publicaron en 1906: *Congres International des Architectes. Sixiéme Session tenue à Madrid du 6 au 13 Avril 1904. Organization, compte rendu et notices*. Madrid: J. Sastre, 1906. El propio Guastavino presentó una comunicación que fue publicada: R. Guastavino Moreno. «Function de la maçonnerie dans les constructions modernes», *Congrès international des architectes*, op. cit. pp. 337-60. La comunicación contiene extensos extractos del presente capítulo.
6. Tema 6. Catástrofe del hotel Darlington durante su construcción.
7. Queremos referirnos en este momento sólo al hormigón de piedra, cascote y mortero de cemento usual. Más tarde haremos algunas consideraciones sobre el hormigón de escorias.
8. La gran mayoría de los forjados actuales se compone de escorias y cenizas mezcladas con yeso, según era costumbre hacer hace algunos años en los forjados y tabiques. Las cenizas procedentes del carbón contienen gran cantidad de materia que puede causar corrosión. Sin embargo, todo contacto continuo de cenizas secas con hierro produce deterioro, debido al ácido sulfúrico que hay en las mismas. Se sabe que destruye tanto el hierro como el hormigón al aumentar la proporción de sulfato de cal o yeso. El 2,75% es el máximo encontrado en la mezcla de varias clases de cemento Portland. Es equivalente al 5% de sulfato de cal, lo que es verdaderamente satisfactorio. Además, ningún incremento de ese porcentaje por el empleo de cenizas acorta la vida del cemento. Véanse las exposiciones de Adler Muller acerca de los forjados de hormigón en *Insurance Engineering* (mayo de 1902), y en *British Fire Prevention Commitee* 234.
9. Guastavino denomina «rápida oxigenación» a la acción del fuego en un incendio [N. del E].
10. La sección en la clave de las bóvedas que soportan las escaleras macizas de la Biblioteca Pública de Boston es de 1/140 del ancho total, mientras que la cúpula de la Biblioteca de la Universidad de Nueva York, con una luz de 21 m, es de sólo 1/190.
11. Nosotros aplaudimos el renacimiento de la construcción cohesiva, la cultivamos y somos sus más entusiastas defensores, pero no para construcciones tales como forjados, techos, cubiertas y suelos.

    Durante los cuarenta años que hemos mantenido la práctica de proyectar y aplicar buena fábrica en edificios, hemos aprendido a apreciar estos materiales. Estábamos poseídos por el entusiasmo de las construcciones monolíticas a causa de las ideas inculcadas a nuestra joven imaginación durante los años en que cursamos los interesantes estudios de construcción en la Escuela de Arquitectura. En el Renacimiento español,

se quiso tratar de revivir esta práctica en las fascinantes masas de sus monumentos, con sus atrevidas cúpulas, que expresan la exuberancia de arte, genio y poder, y que se extienden más allá de los límites de la madre patria, desde California hasta el Perú, para dejar a su paso, numerosos ejemplares de vasta, noble y monumental fábrica en las ciudades de México, Guadalajara, Puebla, Zacatecas, San Luis de Potosí y en otras cien de Iberoamérica.

Al tratarlo en la práctica pronto nos convencimos de que para alcanzar el objetivo deseado, esto es, la obtención de monolitos artificiales, lo que más podíamos lograr artificialmente era lo logrado por los egipcios en sus techos de piedra natural, es decir, losas de piedra, que al exponerse al fuego, estallan, se desprenden y se caen a pedazos. Fue preferible, en vista de esto, hacer una construcción monolítica de ladrillo, o rasilla con mortero de cemento Portland, porque en caso de fuego, lo más que podía ocurrir sería el ablandamiento de la rasilla expuesta, si ésta no fuese semirrefractaria. Sin embargo, no se llegaría a producir ningún agrietamiento, destrucción, derrumbe o cualquier ruina importante en la construcción.

Siguiendo esta marcha observadora, llegamos a la convicción de que la fábrica reforzada (o atirantada, como ahora se la llama) hecha de ladrillo delgado o rasilla de ciertas dimensiones, que contiene del 60 al 75% de su volumen de arcilla semirrefractaria bien cocida, y del 25 al 40% de mortero de cemento Portland, ofrece inmensas ventajas en solidez, seguridad, rapidez de ejecución y eficacia sobre los hormigones recomendados en aquella época (1855) para puentes o construcciones abovedadas. [En este texto aparece de nuevo con claridad la idea errónea de que la construcción cohesiva lleva a una construcción monolítica. Véase la *Introducción* para una discusión sobre esta obsesión de Guastavino y sus orígenes históricos. N. del E.]

12. El hormigón de cemento Portland, cuando está bien hecho, tiene la cualidad de resistir el fuego hasta los 315 ºC, pero cuando los sobrepasa el resultado es desastroso. Véase *Insurance Engineering* (Mayo de 1902): 451. El ingeniero civil N. J. Butler dice lo siguiente: «Sometido a una altísima temperatura, el hormigón de cemento Portland se desintegrará y caerá en pedazos, sobre todo si se le riega con agua. Por tanto lo considero como un material impropio para edificios que han de resistir al fuego» (*Canadian Engineer*: 286–287).
13. Véase la nota 6, más arriba.
14. Somos deudores por esta referencia a nuestro amigo el arquitecto J. B. Pavía.
15. Para referencias, consúltense las publicaciones sobre Vitruvio en la Biblioteca de la Universidad de Columbia de Nueva York.
16. Véase el Apéndice documental 1, pág. 159.
17. Veáse Apéndice documental 2, pág. 161.
18. Véase Choisy, *El arte de construir en Roma*, op. cit.
19. Véase R. Guastavino, *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction.* Boston: 1893. [Primera parte del presente libro.]
20. Debido también a falta de buena aplicación, la llamada bóveda de dovela cerámica hueca, es decir, el sistema belga de bóvedas de dovelas huecas tendidas entre vigas de hierro, ha recibido de manos de sus constructores y fabricantes —a causa del espantoso incendio de Baltimore— un golpe mortal que remata el recibido anteriormente en el incendio de Paterson. Es cierto que la falta no es toda de los constructores, sino de los mismos fabricantes, que en su deseo de obtener un coste de transporte más bajo para poder competir con los mercados extranjeros, han reducido el espesor de los bloques

hasta lo imposible, con el resultado de que se corresponden más bien a la cerámica decorativa vitrificada que a la propia para la construcción. El método de colocar bloques o dovelas a tizón —es decir, usar la parte hueca como lecho en los arcos— también ha sido también un error por parte del fabricante, lo mismo que la introducción de los elementos metálicos traccionados entre las dovelas. (Véase el apartado de los «Efectos de la dilatación térmica en la fábrica», p. 134)

Cuatro son las desviaciones del tratamiento y función racional de los arcos de dovelas huecas: en primer lugar, la inadecuada e impropia construcción de las dovelas huecas por obreros incompetentes o mal dirigidos; segunda, la imprudente reducción de los espesores de la cerámica en los bloques o dovelas; tercera, la forma defectuosa de las dovelas, con el fin de facilitar su fabricación, dejando que la parte hueca forme los lechos, impropio en la verdadera fábrica de arcos; y por último, la deficiente función de las dovelas cuando se introducen tirantes de hierro como elementos traccionados de sostén , alterando el funcionamiento normal de todo arco. Estas cuatro observaciones son la base de la presente lección. Se da, no importa si temporalmente, un golpe mortal a uno de los mejores materiales refractarios que se conocen cuando se aplica con inteligencia. Esperamos que la lección sea provechosa y sirva de beneficio tanto al buen uso del material en los edificios, como a la racional y adecuada fabricación de la dovela cerámica.

21. Entre otras, las garantías sanitarias son las siguientes: ventilación directa en las viviendas y retretes, evitar la humedad en las casas, evitar el paso de gases o emanaciones nocivas entre las viviendas y el uso de tubos no absorbentes para los desagües.
22. Decimos «función material» o mecánica porque la fábrica como material de construcción tiene, además, la función decorativa o de embellecimiento.
23. Veáse Apéndice documental 3. Se trata de un extracto de la conferencia en el 4º Congreso Internacional de 1893. Se publica aquí con la intención de explicar la idea exacta de la fábrica cohesiva armada y la función del esqueleto.
24. Veáse Apéndice documental 4.

## Textos Sobre Teoría e Historia de las Construcciones

F. Bores, J. Fernández Salas, S. Huerta, E. Rabasa (Eds.). **Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

A. Casas, S. Huerta, E. Rabasa (Eds.). **Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

A. Choisy. **El arte de construir en Roma.**

A. Choisy. **El arte de construir en Bizancio.**

A. Choisy. **El arte de construir en Egipto.**

A. Choisy. **Historia de la arquitectura.** (en preparación)

A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. A. Tabales, (Eds.). **Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

R. Guastavino. **Escritos sobre la construcción cohesiva.**

J. Heyman. **Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica.**

J. Heyman. **El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica.**

J. Heyman. **La ciencia de las estructuras.**

J. Heyman. **Vigas y pórticos.**

J. Heyman. **Análisis de estructuras. Un estudio histórico.**

S. Huerta. **Arcos, bóvedas y cúpulas.**

S. Huerta (Ed.). **Las bóvedas de Guastavino en América.**

S. Huerta (Ed.). **Proceedings of the First International Congress on Construction History.**

S. Huerta (Ed.). **Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción.**

S. Huerta (Ed.). **Essays in the history of the theory of structures.**

J. R. Perronet. **La construcción de puentes en el siglo XVIII.**

H. Straub. **Historia de la ingeniería de la construcción.** (en preparación)

A. Truñó. **Construcción de bóvedas tabicadas.**

E. Viollet-le-Duc. **La construcción medieval.**

H. J. W. Thunnissen. ***Bóvedas: su construcción y empleo en la arquitectura.*** (en preparación)


ISBN 84-9728-237-X
9 788497 282376